

**ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE PROCESOS DE DISEÑO Y
CONSTRUCCIÓN DE LOS SISTEMAS TRADICIONAL Y PREFABRICADO DE
LOSAS DE ENTREPISO PARA EDIFICACIONES DE HASTA 4 NIVELES**

**BRIAN STEVEN SANABRIA RIAÑO
CÓDIGO: 504592**

**UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL
BOGOTÁ D.C.
2017**

**ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE PROCESOS DE DISEÑO Y
CONSTRUCCIÓN DE LOS SISTEMAS TRADICIONAL Y PREFABRICADO DE
LOSAS DE ENTREPISO PARA EDIFICACIONES DE HASTA 4 NIVELES**

BRIAN STEVEN SANABRIA RIAÑO

Trabajo de investigación para optar por el título de Ingeniero Civil

**Director
ING. PhD. EDGAR RICARDO MONROY VARGAS**

**UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL
BOGOTÁ D.C.
2017**



Atribución-NoComercial-CompartirIgual 2.5 Colombia (CC BY-NC-SA 2.5)

La presente obra está bajo una licencia:

Atribución-NoComercial-CompartirIgual 2.5 Colombia (CC BY-NC-SA 2.5)

Para leer el texto completo de la licencia, visita:

<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/2.5/co/>

Usted es libre de:



Compartir - copiar, distribuir, ejecutar y comunicar públicamente la obra
hacer obras derivadas

Bajo las condiciones siguientes:



Atribución — Debe reconocer los créditos de la obra de la manera especificada por el autor o el licenciante (pero no de una manera que sugiera que tiene su apoyo o que apoyan el uso que hace de su obra).



No Comercial — No puede utilizar esta obra para fines comerciales.



Compartir bajo la Misma Licencia — Si altera o transforma esta obra, o genera una obra derivada, sólo puede distribuir la obra generada bajo una licencia idéntica a ésta.

Nota de aceptación

ING. PhD. EDGAR RICARDO MONROY VARGAS
Director de Proyecto

Firma del presidente del Jurado

Firma del Jurado

Firma del Jurado

Bogotá, noviembre de 2017

DEDICATORIA

A mis padres, Simón y Nancy, por su apoyo incondicional en todos los momentos de mi vida y porque sé lo felices que son con este logro.

A mis hermanos, Edison, Rubén y Miguel que saben que siempre los llevo en mi corazón,

A Lady, por mantenerse a mi lado aún, cuando en algunos momentos de este proceso todo parecía ponerse más difícil.

AGRADECIMIENTOS

Al único y sabio Dios, por medio de Jesucristo, porque de Él, por Él y para Él son todas las cosas. A Dios sea la gloria por siempre.

A la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, mi alma mater, y a la Universidad Católica de Colombia, por haberme abierto sus puertas y brindado los conocimientos para ser el profesional que puedo ser hoy.

Al Ingeniero Ricardo Monroy por su confianza y guía durante el desarrollo de este trabajo de investigación.

CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN.....	14
1. GENERALIDADES.....	15
1.1. ANTECEDENTES.....	15
1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	16
1.3 OBJETIVOS	16
1.3.1 Objetivo General.....	16
1.3.2 Objetivos Específicos	16
1.4 JUSTIFICACIÓN.....	17
1.5 DELIMITACIÓN	17
1.5.1 Espacio.....	17
1.5.2 Tiempo	18
1.5.3 Contenido	18
1.5.4 Alcance.....	18
1.6 MARCO REFERENCIAL	18
1.6.1 Marco teórico.....	18
1.6.1.1 Concreto en la construcción	18
1.6.1.2 Sistema constructivo tradicional	19
1.6.1.3 Construcción tradicional en Colombia	20
1.6.1.4 Sistema de construcción prefabricado	21
1.6.1.5 Construcción prefabricada en Colombia	21
1.6.2 Marco Conceptual	22
1.6.2.1 Sistemas constructivos.....	22
1.6.2.2 Sistema constructivo tradicional	23
1.6.2.3 Sistema constructivo prefabricado.....	23
1.6.2.4 Conceptos generales en ingeniería y construcción.....	24
1.6.2.5 Construcción de entresijos con elementos prefabricados	24

1.6.3 Marco Normativo	25
1.6.3.1 Integridad estructural	25
1.6.3.2 Consideraciones para elementos prefabricados	26
1.6.3.3 Consideraciones para entrepisos prefabricados	27
1.7 METODOLOGÍA	28
1.7.1 Tipo de estudio	28
1.7.2 Fuentes de Información	28
1.8 DISEÑO METODOLÓGICO.....	28
2. PROCESOS DE DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN	29
2.1 ESTUDIOS GEOTECNICOS	29
2.2 DISEÑO ARQUITECTÓNICO	29
2.3 DISEÑO ESTRUCTURAL.....	30
2.3.1 Predimensionamiento	30
2.3.2 Solicitaciones de carga	30
2.3.3 Diseño sísmico	30
2.3.4 Materiales estructurales.....	31
2.3.5 Análisis sísmico de la estructura.....	31
2.3.6 Diseño de los elementos estructurales	31
2.4 DISEÑO DE LA CIMENTACIÓN	32
2.5 DISEÑO SÍSMICO DE LOS ELEMENTOS NO ESTRUCTURALES	32
2.6 REVISIÓN DE LOS DISEÑOS.....	32
2.7 CONSTRUCCIÓN	32
2.7.1 Componentes generales de una estructura	33
2.7.1.1 Columnas	33
2.7.1.2 Vigas	34
2.7.1.3 Losas de entrepiso	34
2.7.2 Proceso constructivo en edificios de concreto reforzado vaciado in situ ...	35
2.7.2.1 Columnas	35

2.7.2.2 Encofrado para vigas y losas de entrepiso	36
2.7.2.3 Armado de acero de entrepiso	36
2.7.2.4 Vaciado y curado del concreto de entrepiso	37
2.7.3 Proceso constructivo en edificios de concreto reforzado prefabricado	37
2.7.3.1 La fábrica de prefabricados	38
2.7.3.2 Columnas	39
2.7.3.3 Vigas	40
2.7.3.4 Losas de entrepiso	41
3. DIFERENCIAS CUALITATIVAS ENTRE SISTEMAS CONSTRUCTIVOS.....	45
3.1 RESULTADOS	52
4. CASO DE ESTUDIO	54
4.1 DESCRIPCIÓN DE LA EDIFICACIÓN	54
4.2 CASO A – LOSA DE ENTREPISO PREFABICADA	55
4.2.1 Definición del sistema de entrepiso prefabricado	55
4.2.1.1 Losa de Sótano	55
4.2.1.1 Losa Piso Tipo.....	57
4.2.2 Cargas.....	59
4.2.3 Materiales	59
4.2.4 Proceso de fabricación, transporte y montaje	59
4.2.4.1 Fabricación.....	59
4.2.4.2 Transporte y montaje.....	61
4.3 CASO B - LOSA DE ENTREPISO IN SITU.....	62
4.3.1 Definición del sistema de entrepiso in situ	62
4.3.2 Cargas.....	63
4.3.3 Materiales	64
4.3.4 Proceso constructivo	64
4.4 RESULTADOS	67
4.4.1 Peso de la estructura	68

4.4.2 Calidad de los materiales	69
4.4.3 Cantidad de concreto.....	70
4.4.4 Costo directo	73
4.4.5 Programa de Obra	76
4.3.6 Control de desperdicios	79
5. INDICADORES CUANTITATIVOS	81
5.1 Indicador Peso de la Estructura – I _{PE}	81
5.2 Indicador Calidad de los materiales – I _{CM}	81
5.3 Indicador Cantidad de Concreto – I _{CC}	82
5.4 Indicador Costo Directo – I _{APU}	82
5.5 Indicador Programa de obra – I _{PO}	83
5.6 Indicador Sustentabilidad (Control de desperdicios) – I _{CD}	83
5.7 Consolidación de indicadores	84
CONCLUSIONES	85
RECOMENDACIONES.....	87
BIBLIOGRAFIA.....	88
ANEXO A – DISEÑOS CASO A	91
ANEXO B – CÁLCULOS DE DISEÑO CASO B.....	92

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1: Matriz de diferencias cualitativas	47
Tabla 2. Resultados evaluación cualitativa.	52
Tabla 3: Materiales en Caso A.....	59
Tabla 4: Materiales en Caso A.....	64
Tabla 5: Resumen Peso Losa Caso A	68
Tabla 6: Resumen Peso Losa Caso B	68
Tabla 7: Diferencia de Peso entre cada Caso	69
Tabla 8: Diferencia de f'c en cada Caso.....	70
Tabla 9: Resumen Volumen Losa prefabricada Caso A.....	71
Tabla 10: Resumen Volumen Capa de compresión Caso A	71
Tabla 11: Resumen Volumen Viguetas Caso B	71
Tabla 12: Resumen Volumen Loseta Superior Caso B	72
Tabla 13: Diferencia de volumen de concreto en cada caso	72
Tabla 14. Análisis de precios unitarios para Caso A - Losa Alveolar.....	73
Tabla 15. Análisis de precios unitarios para Caso A - Losa Maciza	74
Tabla 16. Costo directo total Caso A	74
Tabla 17. Análisis de precios unitarios para Caso B.	75
Tabla 18. Diferencia del costo por m2 entre casos.	75
Tabla 19. Duración actividades Caso A	78
Tabla 20. Duración actividades Caso B	78
Tabla 21. Comparación duración actividades	78
Tabla 22. Diferencia en porcentaje de desperdicio de material.	80
Tabla 23. Consolidación de indicadores	84

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1: Columnas.	33
Figura 2: Vigas.	34
Figura 3: Losas de entrepiso.	34
Figura 4: Encofrado de Columnas.	35
<i>Figura 5: Encofrado para vigas y losas.</i>	36
Figura 6: Vaciado Losa.	37
Figura 7: Estructura prefabricada Cinemark Lima.	38
Figura 8: Planta de Prefabricados en Madrid, Cundinamarca.	39
Figura 9: Molde para columnas.	39
Figura 10: Columna Prefabricada	40
Figura 11: Izaje de Columna Prefabricada.	40
<i>Figura 12: Viga para estructuras de entrepiso.</i>	41
Figura 13: Izaje y montaje de viga prefabricada.	41
Figura 14. Almacenamiento Losa Doble T.	42
Figura 15. Tipos de Losa Alveolar según fabricantes en Estados Unidos.	43
Figura 16. Izaje losa maciza.	43
Figura 17. Cadena de valor de aspectos a evaluar	46
Figura 18: Localización proyecto caso de estudio.	54
Figura 19: Elevación edificación entre ejes 0 y 5.	55
Figura 20: Elevación edificación entre ejes 5 y 11.	56
Figura 21: Sistema de piso para Cielo Sótano.	56
Figura 22. Detalle típico viga portante, losa alveolar, capa de compresión y viga de rigidez.	57
Figura 23. Detalle típico viga portante, losa maciza y capa de compresión.	58
Figura 24. Sistema de piso para Piso Tipo.	58
Figura 25. Pista de fabricación losas alveolares	60
Figura 26. Máquina moldeadora de losas alveolares.	60
Figura 27. Proceso de cargue de losa sobre camión.	61

Figura 28. Montaje Losa Alveolar	62
Figura 29: Sección Caso B. Losa Sótano.	63
Figura 30: Sección Caso B. Losa Tipo.....	63
Figura 31. Estructura de superficie de trabajo.....	64
Figura 32. Armado de acero, instalación y retiro de casetón de aligeramiento.....	65
Figura 33. Vaciado losa aligerada.....	65
Figura 34. Acabado final de losa.....	66
Figura 35. Curado losa de entrepiso.	66
Figura 36. Sistema de apuntalamiento de losa de entrepiso tradicional.....	67
Figura 37. Diagrama de flujo parámetros de análisis.	68
Figura 38: Comparación del Peso entre Casos.....	69
Figura 39: Comparación de $f'c$ entre Casos.	70
Figura 40: Comparación de volumen de concreto entre casos.	72
Figura 41. Comparación del costo directo por m^2	76
Figura 42. Recorrido para el transporte de los prefabricados.....	77
Figura 43: Duración de actividades para cada Caso.....	79
Figura 44.Comparación volumen final de concreto teniendo en cuenta % de desperdicio	80
Figura 45. Cadena de valor indicadores evaluados	84

INTRODUCCIÓN

En la actualidad, en el país la mayoría de estructuras para edificaciones son diseñadas y construidas de manera tradicional. Colombia como un país en vía de desarrollo necesita enfrentarse al reto de modernizarse; la innovación es la clave para construir, no sólo edificaciones, sino ciudades de calidad y este debe ser un objetivo claro de los ingenieros civiles¹.

En el mundo, la construcción con elementos de concreto prefabricado transformó la lenta y artesanal construcción tradicional², sin embargo, en Colombia las empresas constructoras se muestran escépticas ante la utilización de nuevas formas de industrialización y por tanto, la prefabricación. Pocas alternativas, mala calidad, costos elevados, entre otras, son las consideraciones para mantener las tecnologías de construcción actuales.

Existen en el país empresas prefabricadoras intentando permear el mercado, no obstante, el desconocimiento de las implicaciones (diseño, costos, tiempos, etc.) de usar prefabricados en la construcción de edificaciones no ha hecho posible su implementación en gran escala.

De acuerdo a lo anterior, en el presente trabajo de investigación se analizarán los procesos constructivos de los métodos tradicional y prefabricado, abordando en primer lugar las generalidades más representativas de ambos, que permitan contextualizar el análisis comparativo y así, encontrar las implicaciones de las diferencias que existen en el diseño y construcción de la estructura de un mismo edificio, con la misma materia prima pero por diferente metodología (tradicional – prefabricado) para finalmente, cuantificar dichas diferencias.

¹ CAMACOL. Noticias: Cámara Colombiana de la Construcción CAMACOL. [En línea] 2014. <https://camacol.co/noticias/innovación-clave-para-la-competitividad-del-sector-de-la-construcción>.

² KOSKELA, Lauri. Is structural change the primary solution to the problems of construction? Watford: Journal Building Research & Information, 2003. p. 85.

1. GENERALIDADES

1.1. ANTECEDENTES

Según el “Consejo Privado de Competitividad” (CPC) en los últimos 15 años, el avance en materia de productividad en el país en el sector de la construcción ha sido prácticamente nulo.

Uno de los llamados de atención hecho a las empresas constructoras del país en la última feria de CAMACOL, es el compromiso con la inversión en innovación y tecnología. De no hacerlo, multinacionales de la construcción que están haciendo presencia en el país se harán con buena parte de los próximos negocios del sector³.

El sector de la construcción en Colombia ha cobrado gran relevancia para el país en los últimos años. El aporte a la economía, la generación de empleo y los programas de vivienda VIS del gobierno, han constituido de la construcción un foco de inversión tanto pública como privada y sin duda se ha convertido en una de las bases del desarrollo nacional.

En el mundo, la prefabricación de las edificaciones ha sido la respuesta para atender a las demandas de productividad. En países como Noruega, Finlandia, Japón, Dinamarca, España, Costa Rica, México y Brasil los prefabricados han cobrado vital importancia por sus aplicaciones, posibilidades en proyectos de edificación, eficiencia sísmica y nuevas tecnologías.

Existen instituciones en el mundo dedicadas a la investigación, desarrollo y difusión de los prefabricados en concreto; en Estados Unidos se encuentra el “Prestressed/Precast Concrete Institute (PCI)”, en Europa se encuentran la “Federation Internationale de la Precontrainte (FIP)”, el “Prestressed Concrete Development Group (PCDG)” y el ANDECE (Asociación Nacional de la Industria del Prefabricado de Hormigón); respecto a los prefabricados en Colombia, es la “Asociación Colombiana de Productores de Concreto” (ASOCRETO) quien se dedica a promover y actualizar sobre nuevas tecnologías.

Sin embargo, los prefabricados en Colombia no han tenido un desarrollo notable. Si bien, existen empresas prefabricadoras en el país, éstas se han dedicado principalmente a la fabricación de elementos como tuberías, adoquines, bordillos, mobiliario urbano, entre otros, obligando a ajustar tanto procesos de diseño como constructivos en las edificaciones, a la aplicación de técnicas “in situ” y de las cuales, salvo el uso de concretos que permiten ser bombeados y algunos adelantos en formaleta, siguen siendo las mismas de hace unos 60 años.

³ EXPOCAMACOL. CAMACOL. Medellín: s.n., 2016.

1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

ASOCRETO en los últimos años ha venido trabajando en la divulgación de información entre el sector, muestra de ello, es el Congreso Internacional de Estructuras Prefabricadas que en 2016 celebró su quinta edición; sin embargo, estos esfuerzos parece que sólo han hecho eco en el sector de infraestructura, pero para los representantes de las edificaciones sigue siendo un tema en segundo plano.

Luego de consultado el estado del arte referente al tema, llama la atención la poca investigación académica y bibliográfica disponible en el país; salvo algunos trabajos de grado, las publicaciones existentes sólo ofrecen una descripción cualitativa donde se citan las propiedades y las enormes ventajas de los elementos de concreto prefabricado.

Estas publicaciones mantienen la incertidumbre en cuanto a costos, tiempos, procesos, etc., y por ello los diseñadores y constructores prefieren mantener sus métodos tradicionales, evitando riesgos que presumen pueden tener, con la implementación de soluciones prefabricadas. Dicho de otro modo, existe escasa bibliografía que evidencia la cuantificación de las diferencias entre las metodologías tradicional y prefabricada.

En virtud de lo anterior, se evidencia, que no están cuantificados en términos de tiempo y costos, la diferencias existentes entre el sistema tradicional y prefabricado, en este caso, para edificaciones de hasta 4 niveles.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo General

Cuantificar las ventajas y desventajas derivadas del análisis comparativo entre los sistemas tradicional y prefabricado en el diseño y construcción de la losa de entrepiso de una edificación de hasta 4 pisos.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Explicar los procesos de diseño y construcción de los sistemas tradicional y prefabricado para el desarrollo de edificaciones de hasta 4 niveles en sus aspectos generales.
- Determinar cualitativamente las diferencias generadas de la implementación de sistemas industriales en la construcción colombiana comparados con la construcción convencional.

- Aplicar con un ejemplo práctico y para un proyecto en la ciudad de Bogotá, el diseño, procesos constructivos, costos directos, programas de obra, control de calidad y el impacto ambiental; presentes en la construcción “in situ” y con prefabricados para una losa de entrepiso.
- Generar indicadores cuantitativos, a partir de las diferencias encontradas entre el sistema tradicional y prefabricado de una losa de entrepiso, que apoyen la toma de decisiones

1.4 JUSTIFICACIÓN

La percepción de la población colombiana hacia la construcción es de lentitud y demora en la entrega de los proyectos, y la realidad habla por sí sola, proyectos como el “Túnel de la Línea” o el “Deprimido de la Calle 94” son ejemplos que no dejan bien parada a la Ingeniería Colombiana.

Sin duda, para ser competitivos ante las demandas mundiales, se deben reducir y cumplir los plazos contractuales con innovación tecnológica e industrialización de los procesos, sin sacrificar los costos y la calidad de las edificaciones. Los prefabricadores están mejor preparados para proporcionar apoyo en la entrega a tiempo de los proyectos⁴.

Se pretende con esta investigación encontrar cualitativamente y cuantitativamente, las diferencias del uso de prefabricados en la estructura de las edificaciones frente a las estructuras tradicionales.

Consultado el estado del arte, no se ha realizado la suficiente investigación en términos de cuantificación de dichas diferencias en tiempo y dinero y se tiene aún, gran incertidumbre frente al concreto prefabricado, no obstante, éste presenta numerosas soluciones que le permiten adaptarse a cualquier proyecto y necesidades específicas.

1.5 DELIMITACIÓN

1.5.1 Espacio

El presente trabajo, en cuanto a las generalidades de cada sistema (tradicional – prefabricado), se abordará a partir de la actualidad del sector de la construcción en el país, teniendo en cuenta características actuales y oportunidades de mejora. Por otro lado, el desarrollo del caso de estudio, se concentrará en un proyecto que se

⁴ PHENG, Low Sui y CHUAN, Choong Joo. Just-In-Time Management of Precast Concrete Components. Singapore: Journal of Construction Engineering and Management, 2001. Vol. 127

construye en la ciudad de Bogotá, buscando tener resultados reales y aplicables a las edificaciones que se levantan en la ciudad.

1.5.2 Tiempo

Como el análisis específico de todo lo que respecta una estructura puede requerir de un tiempo mayor al plazo solicitado para la elaboración de la investigación, el presente documento entrará en detalle en el caso de las losas de entrepiso; se tendrán en cuenta consideraciones de diseño estructural y análisis sísmico, producción en fábrica, montaje en obra, análisis de precios unitarios, medición de rendimientos y duración de actividades.

1.5.3 Contenido

Con la presente investigación se pretende estudiar económica y técnicamente la implementación del uso de prefabricados, y cómo éste, puede ser una respuesta de innovación y de mejora en costos, procesos y tiempos en un proyecto de construcción tradicional. Se estudiarán de manera general los métodos y componentes más usados en el mundo, sus funciones, aplicaciones, mano de obra, equipos requeridos, y su aporte al medio ambiente y a la sustentabilidad⁵.

1.5.4 Alcance

La presente investigación únicamente se remitirá a tratar lo correspondiente a la estructura de las losas de entrepiso en las edificaciones; análisis referentes a acabados, urbanismo, instalaciones técnicas, etc., no serán incluidas en el presente documento. La escasa instrucción impartida desde la Universidad referente a la temática de los prefabricados en concreto podría limitar el avance de la investigación, por esta razón se deberá acudir a profesionales externos a la Universidad para el buen desarrollo del trabajo.

1.6 MARCO REFERENCIAL

1.6.1 Marco teórico

1.6.1.1 Concreto en la construcción

Se cree que los primeros orígenes del concreto datan del año 7.000 a.C. para la construcción de la antigua Babilonia, aunque otros historiadores se dirigen al norte de Chile en el año 3.000 a.C., donde se encontraron muestras de concreto

⁵ PASQUIRE, Christine, GIBB, Alistair y BLISMAS, Nick. What Should You Really Measure If You Want to Compare Pre-fabrication with Traditional Construction? Kenley: Rusell, 2005.

rudimentario. Pero lo que es indudable, es que el primer uso masivo del concreto se remonta a la época del Imperio Romano con numerosas obras que hoy siguen en pie⁶.

Sin embargo, en cuanto al concreto tal como se conoce hoy en día, la historia comenzó en 1794, cuando Joseph Aspdin llevo a cabo los primeros experimentos para conseguir un cemento artificial por calcinación de mezclas de caliza y arcilla. En 1811, James Frost obtuvo una patente basada en experimentos similares. En 1824, Aspdin registró la decisiva patente “El cemento Portland”. Hay que destacar su elección del calificativo “Portland”, ya que implica la idea de “Piedra Artificial”⁷.

El concreto reforzado es el más popular y desarrollado entre los materiales de construcción, ya que aprovecha en forma muy eficiente las características de una buena resistencia a compresión, durabilidad, resistencia al fuego y manejabilidad, junto con las de alta resistencia en tensión y ductilidad del acero, para formar un material compuesto que reúne mucha de las ventajas de ambos materiales componentes⁸.

1.6.1.2 Sistema constructivo tradicional

Las técnicas de construcción tradicionales consistían en un bagaje de soluciones a los problemas particulares que el medio, los materiales o la búsqueda de la máxima funcionalidad planteaban a la hora de construir una vivienda concreta. A este factor se unía la necesidad de completar la obra en un período acotado de tiempo: el que había entre la cosecha y el período de lluvias. Las tradiciones locales generaban sus propias tipologías independientemente de los factores geográficos y climáticos de esta forma, la idiosincrasia cultural y la disponibilidad de recursos materiales daban como resultado proyectos individuales que se iban modificando en función de las dificultades que surgían en la construcción⁹.

En 1872 el ingeniero Deacon expresó que el concreto premezclado, preparado especialmente para ser empleado directamente en la obra (“in situ”) sería una gran ventaja para la industria de la construcción. Y así nació la idea del concreto premezclado y construcción tradicional.

⁶ LÓPEZ VIDAL, Alejandro y FERNÁNDEZ ORDÓÑEZ, David. La construcción con prefabricados de concreto: Una historia por escribir. Bogotá: Noticreto, 2015.

⁷ PEREA RENTERÍA, Yubely Aleida. Sistemas constructivos y estructurales aplicados al desarrollo habitacional. Medellín : Universidad de Medellín, 2012. págs. 34.

⁸ Ibid., p.35

⁹ LÓPEZ FLORES, Jorge Armando. Fundamentos de Edificación: Notas de Clase. [Presentación] 2016.

Ese mismo año se estableció en Inglaterra la primera planta de concreto premezclado en el mundo. Se continuó en Alemania en 1903, Estados Unidos en 1913, Dinamarca en 1926, Noruega y Suecia en 1937, Australia en 1939, Islandia en 1943, Holanda en 1948, México 1950, Bélgica en 1956, Finlandia y Sudáfrica en 1958, Austria en 1961, Italia en 1962, Israel en 1963 y en Argentina en 1964¹⁰.

1.6.1.3 Construcción tradicional en Colombia

El concreto se estableció de manera definitiva dentro de la actividad constructiva del país relegando, y en ocasiones haciendo parecer obsoletos, otros materiales constructivos como la tierra y la piedra, que estuvieron presentes en nuestro territorio desde antes de la llegada de los españoles.

Su importancia fue tal, que en ocasiones la cantidad de obras desarrolladas con este material en una región se tomaba como índice de desarrollo. Es posible, entonces, considerar que su uso dividió en dos la historia de la construcción en el siglo 20: la una antes de la aparición del concreto reforzado y la otra después de conocido el material.

Es tan profunda la influencia de este material, que un constructor de la primera época no entendería seguramente el lenguaje ni los métodos empleados por los técnicos de la edad actual. Para 1950 la resistencia de los concretos de uso corriente era de apenas 14Mpa (2.000 psi) a los 28 días de edad, con los agregados usuales de la época, y el consumo promedio de cemento era de 350 Kilos por metro cúbico de concreto. Sin embargo, la utilización de los nuevos agregados obtenidos en las Minas del Tunjuelo en el sur de Bogotá, se lograron resistencias de hasta 23,5Mpa (3.350 psi) a los 28 días de edad, con apenas 330 kilos de cemento por metro cúbico de concreto. Es decir, mucha mayor resistencia con menos contenido de cemento. Esto revolucionó la industria y demostró la importancia de la calidad de los agregados. A partir de ahí el consumo de concreto premezclado aumentó rápidamente, se fundó la Productora de Agregados S.A. y la Central de Mezclas Ltda., pasó a ser la Central de Mezclas S.A. La popularización del concreto en nuestro país coincidió con la llegada de lo que se ha denominado Movimiento Moderno que, como lo explica el suizo Siegfried Giedion en su célebre libro Espacio, tiempo y arquitectura, tenía una profunda relación con el desarrollo de la ingeniería. Por esta razón, y fruto de las nuevas posibilidades de la ciencia y la construcción, se dio inicio a una nueva tradición dentro de la cual el hierro y el cemento cumplieron un papel fundamental y establecieron un nuevo lenguaje de construcción en el país¹¹.

¹⁰ ASOCIACIÓN ARGENTINA DEL HORMIGÓN PREMEZCLADO. Un poco de historia. s.l.: Revista Construcción y Tecnología, 2008. pág. 29.

¹¹ ASOCRETO. La construcción del concreto en Colombia. Apropiación, Expresión - Proyección. Bogotá: Panamericana formas e impresiones, 2006.

1.6.1.4 Sistema de construcción prefabricado

El origen de la prefabricación, entendida como la aplicación de procesos industriales a la construcción se puede encontrar a mediados del siglo XVIII. La revolución industrial, con la llegada de los nuevos materiales como el acero y el vidrio, tuvo un gran impacto en la construcción¹².

Pero en cuanto a la fusión del material (concreto) y la técnica (prefabricación), el concreto prefabricado es una forma de construir todavía joven, si nos detenemos en que el desarrollo del concreto se inició con la anteriormente mencionada patente de Aspin en 1824¹³.

Originalmente el concreto fue visto como reemplazo de la piedra natural y fue usado como prefabricado en bloques. A medida que la industria se volvió más mecanizada, se llegaron a tener grandes piezas prefabricadas que dieron inicio a los componentes actuales que se utilizan para edificaciones¹⁴.

1.6.1.5 Construcción prefabricada en Colombia

Desde comienzos del siglo XX en Colombia por el año de 1910, se dio inicio a la primera fábrica de cementos artificiales motivada por la realización de la primera planta hidroeléctrica de la Empresa de Energía de Bogotá.

El cemento utilizado en esta construcción fue importado en su totalidad por los hermanos Samper Brush. Con el objeto de contribuir al desarrollo de modernos sistemas de construcción, que sustituyeran los hasta entonces conocidos de tapia pisada, bahareque, el adobe y la mampostería con argamasa de cal, la Compañía de Cementos Samper estableció una oficina técnica con ingenieros civiles y arquitectos, cuya primera labor consistió en capacitar maestros de obra y oficiales de construcción para labores hasta entonces desconocidas en el medio, tales como la clasificación y lavado de agregados pétreos adecuados, su dosificación y mezcla con cemento en proporciones preestablecidas, la figuración y colocación de varillas de refuerzo de acero en concreto armado, la elaboración técnica de formaletas para columnas y vigas, etc. La Compañía de Cementos Samper dio comienzo a la primera producción de prefabricados de concreto, consistentes en baldosas para pisos y tubos para drenaje; para tal fin organizó en 1916 y dentro de los mismos predios de la fábrica, un departamento llamado desde entonces Manufacturas de Cemento. Los primeros tubos de concreto fueron producidos en moldes individuales metálicos, utilizando una mezcla

¹² LÓPEZ Y FERNÁNDEZ, Op. cit., p.133

¹³ LÓPEZ Y FERNÁNDEZ, Op. cit., p.133

¹⁴ CARREÑO BUSTOS, Alejandro David. Estudio de la prefabricación en concreto reforzado y su influencia en la construcción de estructuras en Colombia. Bogotá D.C.: Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, 2015., p.31

húmeda, compactación por sistemas manuales y unión del tipo machihembrado. Con motivo de la primera ampliación de la fábrica de cemento y de la crisis económica mundial presentada a partir de 1929, la "Compañía de Cemento Samper" fue oxigenada mediante el ingreso a la misma de nuevos e importantes grupos de accionistas. La razón social se cambió a "Fábrica de Cemento Samper" y el departamento de Manufacturas de Cemento, se convirtió en una nueva sociedad del todo independiente, a la cual los accionistas fundadores de la Compañía de cemento aportaron, entre otros bienes, los equipos y moldes hasta entonces utilizados en prefabricación. Fue así que el 1o. de julio de 1938 se constituyó Manufacturas de Cemento S.A.¹⁵.

En el año 1967 con motivo del Seminario Latinoamericano sobre prefabricación de viviendas celebrado en Copenhague, Álvaro Andrade Mejía exponía con motivo del déficit de vivienda en el país la necesidad de construcción de edificaciones prefabricadas en Colombia, pues consideraba, que los métodos de construcción eran artesanales, con gran desperdicio y con procesos lentos¹⁶. Sin embargo, parece que sus recomendaciones no fueron totalmente atendidas pues a hoy 50 años después, seguimos con métodos artesanales, con sobre costos en los presupuestos y con obras que parecen casi interminables.

El uso de prefabricados en Colombia se aplica principalmente en obras de alcantarillado y manejo de aguas teniendo en cuenta la amplia experiencia y trayectoria de algunas empresas en el país; para proyectos de infraestructura, tienen especial uso en los viaductos que se construyen y proyectan con la ola de vías de cuarta generación en el país; en cuanto edificaciones, su uso se generaliza para viviendas unifamiliares y algunas compañías como Prefabricasa se dedican principalmente a la vivienda de interés social prefabricada.

1.6.2 Marco Conceptual

1.6.2.1 Sistemas constructivos

Es un conjunto de elementos, materiales, técnicas, herramientas, procedimientos y equipos, que son característicos para un tipo de edificación en particular. Todo sistema constructivo debe cumplir con las 3 variables o premisas de organización o clasificación de los sistemas constructivos¹⁷:

- Herramientas
- Mano de obra
- Materiales

¹⁵ Ibid., p. 31

¹⁶ ANDRADE Mejía, Álvaro. Seminario Latinoamericano sobre Prefabricación de Viviendas. Copenhague : Santiago CEPAL, 1967., p.1

¹⁷ LÓPEZ Y FERNÁNDEZ, Op. cit., p.133

1.6.2.2 Sistema constructivo tradicional

Entendemos por “construcción tradicional” a la que realiza en el lugar “in situ” todas aquellas tareas necesarias para materializar la mayor parte de los subsistemas de un edificio. Este tipo de actividades, deben ser ejecutadas por personas calificadas que asimilaron sus oficios a través de la información recibida por sus antecesores, siendo por lo tanto, un aprendizaje “generacional” y como tal, la improvisación y espontaneidad son palabras frecuentes en el desempeño. Los materiales utilizados son prácticamente los mismos que se han utilizado por décadas, produciendo algunas variables en su lenguaje formal pero conservando las mismas técnicas de construcción (el progreso más significativo está vinculado con la inclusión de los mecanismos industriales en la producción de materiales de construcción). El proceso de vinculación entre las partes ha sido, en general, a través de juntas y uniones húmedas en base a cemento, cal y arena. Los espacios arquitectónicos quedan definidos por muros, que a su vez, están constituidos por bloques de tierra cocida que proponen en su sucesión, una especie de modulación, aunque, de ser necesario, éstos pueden seccionarse para conseguir las medidas deseadas. Posiblemente uno de los motivos más importantes de su difusión y actualidad esté relacionado con la nobleza y durabilidad de los edificios resultantes¹⁸.

1.6.2.3 Sistema constructivo prefabricado

La construcción prefabricada, en su más amplia acepción, es el resultado de la elaboración previa, organizada, cíclica y en serie de elementos, para que con un montaje ordenado y continuo se obtengan estructuras completas, buscando satisfacer las normas de calidad, rapidez, economía, resistencia, aspecto, habitabilidad, funcionalidad, confort y duración. Es por esto que se caracteriza por dos fases industrializadas: producción en serie y montaje posterior mediante acoplamiento de elementos y consolidación de uniones, o sea, construcción en serie y montaje. Esta prefabricación puede ser total o parcial según su grado de utilización¹⁹.

Las estructuras de concreto prefabricado armado y pretensado proporcionan una solución de alta resistencia, estable, duradera y robusta para cualquier estructura de varios pisos, y son ampliamente considerados como una tecnología de alta calidad, económica y arquitectónicamente versátil para la construcción de edificios de varios pisos. Los edificios resultantes satisfacen una amplia gama de necesidades comerciales e industriales. Estos edificios se comportan de manera

¹⁸ UNIVERSIDAD NACIONAL DE LA PLATA. Catedra de Procesos Constructivos. La Plata: s.n., 2014. p. 1

¹⁹ Ibid., p. 2

diferente a aquellos donde el concreto se funde in situ, con los componentes sujetos a diferentes fuerzas y movimientos²⁰.

1.6.2.4 Conceptos generales en ingeniería y construcción

- **Elementos estructurales:** Un elemento estructural es cada una de las partes que constituye una estructura y que posee una función resistente dentro del conjunto. En una edificación los principales elementos estructurales pueden ser: Cimientos, Columnas, Vigas y Losas de entrepiso.
- **Concreto:** Se refiere al material compuesto que consiste esencialmente en un medio ligante dentro del cual hay partículas o fragmentos de agregado, generalmente una combinación de agregado fino y agregado grueso. Normalmente se refiere a la combinación de cemento, arena y grava.
- **Acero:** El Acero es básicamente una aleación o combinación de hierro y carbono (alrededor de 0,05% hasta menos de un 2%). Algunas veces otros elementos de aleación específicos tales como el Cr (Cromo) o Ni (Níquel) se agregan con propósitos determinados. Ya que el acero es básicamente hierro altamente refinado (más de un 98%), su fabricación comienza con la reducción de hierro (producción de arrabio) el cual se convierte más tarde en acero.
- **Concreto vaciado in situ:** es el concreto que se deposita en el lugar donde se requiere como parte de una estructura.
- **Prefabricado estructural:** son elementos fabricados especialmente para poderse ensamblar en alguna obra de construcción. Estos elementos se denominan prefabricados debido a que su fabricación se hace tiempo antes de su ensamble en la obra, además son elementos estructurales en la medida que hagan parte de la estructura de la obra.

1.6.2.5 Construcción de entrepisos con elementos prefabricados

Las losas prefabricadas como sistemas de entrepiso pueden ser, Losas doble T (Losas PT), Losas alveolares, Prelosas (armadas o pretensadas) y Losas macizas.

- **Losas Doble T:** Elementos de losa, que como su nombre lo indica es una losa apoyada sobre dos secciones perpendiculares a la losa horizontal que actúan como viga. También se pueden utilizar para sistemas de cubierta dando la posibilidad de aberturas y cubrir grandes luces. Pueden ser usadas en cualquier tipo de estructura, pero principalmente se utilizan en estructuras de parqueaderos,

²⁰ ELLIOT, Kim y JOLLY, Colin. Multi-storey precast concrete framed structures. Hoboken: Wiley, 2013

edificios de oficinas y facilidades industriales con distancias entre ejes considerables.

- **Losas alveolares:** Son prefabricados de concreto pretensado utilizados horizontalmente como losas para entrepisos, con huecos a lo largo de la pieza llamados alvéolos con espesor constante y superficie plana, logrando una reducción de peso sin disminuir su capacidad de carga y manteniendo la resistencia estructural. La mayor aplicación de estos componentes es como losas de piso y losas de cubierta.
- **Prelosas:** Son elementos pretensados o armados y macizos que llevan un triacero o disposición de refuerzos longitudinales soldados en forma triangular, para posteriormente poder vaciar una capa de compresión in situ, generando una acción compuesta. Se utilizan de manera muy similar a los sistemas de entrepiso en losa alveolar pero con la diferencia que estos funcionan como formaleta y apoyo para el personal de obra. Es un componente que puede ser utilizado también para entrepisos y cubiertas dependiendo de las características del proyecto. Es útil en la elaboración de pasarelas de circulación, áreas para parqueaderos y circulación en puentes.
- **Losas macizas:** Se utilizan en zonas puntuales y generalmente en condiciones en donde la prefabricación es total, es decir, donde se tiene tanto el sistema de resistencia a cargas gravitacionales y laterales junto con el entrepiso con elementos prefabricados. Una losa maciza prefabricada puede ser útil en la implementación de balcones.

1.6.3 Marco Normativo

1.6.3.1 Integridad estructural

La integridad estructural tiene como objetivo proporcionar la seguridad global de la edificación ante una falla local sin permitir que el daño se expanda o se genere progresivamente. El sistema lateral de resistencia sísmica debe ser determinado del análisis preliminar de cada estructura. El diafragma de entrepiso juega un papel determinante al momento de la distribución de las fuerzas laterales, aportando ductilidad y resistencia a la estructura global²¹.

El Título C de la NSR-10 contiene disposiciones para el diseño y la construcción de los elementos de concreto reforzado de una estructura en la cual las fuerzas de diseño, relacionadas con los movimientos sísmicos, se han determinado con base

²¹ CARREÑO. Op. Cit., p.98

en la disipación de energía en el rango no lineal de respuesta²². (Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, 2010). Las consideraciones de diseño sismoresistente que se deben tener en cuenta también están consignadas en el código ACI-318S-14²³.

1.6.3.2 Consideraciones para elementos prefabricados

Como se establece en el Título A de la NSR-10 y de acuerdo con lo establecido en el Artículo 12 de la Ley 400 de 1997, se permite el uso de sistemas de resistencia sísmica que estén compuestos, parcial o totalmente, por elementos prefabricados, que no estén cubiertos por este Reglamento, siempre y cuando cumpla uno de los dos procedimientos siguientes²⁴:

(a) Se utilicen los criterios de diseño sísmico presentados en A.3.1.7, o

(b) Se obtenga una autorización previa de la Comisión Asesora Permanente para el Régimen de Construcciones Sismo Resistentes, de acuerdo con los requisitos y responsabilidades establecidas en el Artículo 14 de la Ley 400 de 1997.

De acuerdo al Título A.3.1.7 de la NSR-10 pueden construirse edificaciones cuyo sistema de resistencia sísmica esté compuesto por elementos prefabricados. El sistema prefabricado debe diseñarse para las fuerzas sísmicas obtenidas de acuerdo a la NSR-10 usando un coeficiente de capacidad de disipación de energía básico, tal como lo define el Capítulo A.13 igual a uno y medio ($R_0=1.5$). Cuando se demuestre con evidencia experimental y de análisis, que el sistema propuesto tiene una resistencia, capacidad de disipación de energía y capacidad de trabajo en el rango inelástico igual o mayor a las obtenidas con la estructura construida utilizando uno de los materiales prescritos por este Reglamento, puede seguirse lo establecido en el literal b del Título A.1.4.2 de la NSR-10, pero en ningún caso el valor de R_0 podrá ser mayor que el fijado por la NSR-10 para sistemas de resistencia sísmica contruidos monolíticamente con el mismo material estructural²⁵.

²² ASOCIACIÓN COLOMBIANA DE INGENIERÍA SÍSMICA. Título C – Concreto estructural. Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10. Bogotá: Diario Oficial, 2010. Capítulo C.21.

²³ AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. CHAPTER 4 — Structural Systems Requirements. Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-S14, and “Commentary”. ACI 318RS-14). Farmington Hills: American Concrete Institute, 2014, p. 58.

²⁴ ASOCIACIÓN COLOMBIANA DE INGENIERÍA SÍSMICA. Título A – Requisitos generales de diseño y construcción sismo resistente. Reglamento colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10. Bogotá: Diario Oficial, 2010, Capítulo A.1.

²⁵ Ibid., Capítulo A.3

Los requisitos de diseño y construcción para elementos estructurales de concreto prefabricado difieren en algunos aspectos de aquellos para elementos estructurales de concreto construido en sitio, y dichas diferencias son abordadas en el capítulo C.16 de la NSR-10. En las referencias C.16.1 a C.16.7 se dan recomendaciones más detalladas respecto a concreto prefabricado.

Cuando las disposiciones para concreto construido en sitio se aplican también al concreto prefabricado, ellas no se han repetido en el capítulo C.16. De igual manera, los aspectos relacionados con concreto compuesto en el Capítulo C.17 y con concreto preesforzado en el Capítulo C.18 que se aplican al concreto prefabricado no se han repetido.

1.6.3.3 Consideraciones para entrepisos prefabricados

El capítulo C.13 de la NSR-10 establece las disposiciones que se deben aplicar al diseño de sistemas de losas en una estructura. El título C.13.1.8 permite utilizar elementos prefabricados como parte de los sistemas de losas siempre y cuando se cumplan con los requisitos de los capítulos C.16 y C.17.

Para los sistemas estructurales resistentes a cargas laterales que se proyecten con elementos prefabricados, es de vital importancia conectar vigas, columnas o muros con la suficiente resistencia y rigidez para aportar ductilidad y estabilidad a toda la estructura. La función del entrepiso será actuar como un diafragma para transferir las fuerzas inerciales del piso a los elementos del sistema de carga lateral²⁶.

En virtud de lo anterior, para construcciones de concreto prefabricado, según lo establecido en el Título C.7.13.3 de la NSR-10 deben proporcionarse amarres de tracción en sentido transversal, longitudinal y vertical, y alrededor del perímetro de la estructura, para unir efectivamente los elementos. También deben seguirse los lineamientos del título C.16.5 del mencionado reglamento.

En sistemas de entrepiso, la construcción del diafragma puede ser compuesta o no compuesta²⁷.

Será compuesta cuando como diafragma se use una losa fundida en sitio sobre los elementos prefabricados garantizando completo amarre y proporcionando más capacidad de carga (momentos negativos). La superficie del prefabricado antes de vaciar el concreto debe estar rugosa, limpia y húmeda con el fin de lograr la completa adherencia entre las partes. Esta situación se encuentra claramente

²⁶ CARREÑO. Op. Cit., p.148

²⁷ CARREÑO. Op. Cit., p.146

estipulada en el reglamento colombiano NSR-10 en el título C21.11.4. Este tipo de construcción se utiliza en zonas de actividad sísmica alta.

Será no compuesta cuando no se use ningún tipo de losa superior fundida en sitio, debido a que los elementos prefabricados poseen cierto peralte que les proporciona la suficiente resistencia a flexión. La NSR-10 en el título C21.11.5 permite un afinado de piso no compuesto construido en sitio sobre componentes prefabricados, pero no existe ninguna acción compuesta entre el afinado y el componente. La función como diafragma la deben proporcionar los componentes prefabricados y sus conexiones estar diseñadas para resistir las fuerzas sísmicas de diseño. Esta construcción se utiliza en zonas de actividad sísmica baja o moderada.

1.7 METODOLOGÍA

1.7.1 Tipo de estudio

El desarrollo de la investigación será de tipo descriptivo y analítico, entendiendo que por una parte, se describirán las consideraciones y diferencias más generales entre los sistemas tradicional y prefabricado y por otro lado, se analizarán y cuantificarán estas diferencias a partir del desarrollo de un caso de estudio.

1.7.2 Fuentes de Información

Se acudirá a bibliografía, artículos académicos, normativa aplicable y se consultará con expertos tanto nacionales como internacionales. Se participará además, en seminarios relacionados a la temática.

1.8 DISEÑO METODOLÓGICO

La investigación se desarrollará en tres etapas fundamentales:

- a. Descripción general de cada sistema a comparar (tradicional y prefabricado).
- b. Para cada sistema constructivo se abordarán lineamientos generales de diseño y construcción a tener en cuenta para una estructura de 4 pisos a construirse en la ciudad de Bogotá. Se profundizará en detalle en el caso de estudio de la investigación (losas de entrepiso).
- c. Se examinarán parámetros dentro de los procesos de diseño y construcción de losas de entrepiso que están presentes y comunes en ambos casos, tanto en sistemas tradicionales como en prefabricados. A partir de éstos, se generarán los correspondientes indicadores de análisis para finalizar con las conclusiones y recomendaciones de la investigación.

2. PROCESOS DE DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN

Una estructura diseñada correctamente debe cumplir con los siguientes objetivos²⁸

- Apropiaada
- Económica
- Segura
- Durable

En Colombia, el diseño y construcción de todas las edificaciones que se desarrollen en el país, sin importar el tipo de sistema estructural, deberán someterse y aplicar los lineamientos establecidos en la NSR, siguiendo los pasos que se citan a continuación²⁹:

- Estudios Geotécnicos
- Diseño Arquitectónico
- Diseño Estructural
- Diseño de la cimentación
- Diseño sísmico de elementos no estructurales
- Revisión de los diseños
- Construcción
- Supervisión técnica

2.1 ESTUDIOS GEOTECNICOS

Los datos geotécnicos incluidos los ensayos de laboratorio y pruebas de campo son necesarios, pues el diseño estructural depende de las propiedades de los materiales que servirán de fundación.

El estudio geotécnico debe dar las recomendaciones que debe seguir el ingeniero estructural para el diseño de la cimentación y obras de contención, la definición de los efectos sísmicos locales, los procedimientos constructivos que debe emplear el constructor, y los aspectos especiales a ser tenidos en cuenta por el supervisor técnico³⁰.

2.2 DISEÑO ARQUITECTÓNICO

²⁸ BUILDING OFFICIALS CODE ADMINISTRATORS INTERNATIONAL. International Building Code . 2000.

²⁹ AIS, Op. cit., Capítulo A.1

³⁰ ASOCIACIÓN COLOMBIANA DE INGENIERÍA SÍSMICA. Título H – Estudios Geotécnicos. Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10. Bogotá: Diario Oficial, 2010.

Es un concepto que unifica todos los elementos de una estructura en un todo coherente y funcional y que se centra en las necesidades, requerimientos y restricciones de un propietario³¹.

2.3 DISEÑO ESTRUCTURAL

Una estructura se debe diseñar para que tenga resistencia y rigidez adecuadas ante las cargas mínimas de diseño prescritas por la NSR-10; además, verificarse que dispone de rigidez adecuada para limitar la deformabilidad ante las cargas de servicio, de tal manera que no se vea afectado el funcionamiento de la edificación.

2.3.1 Predimensionamiento

A partir del diseño arquitectónico y una vez establecida la localización de los ejes estructurales, se escogerá la estructura más apropiada a partir de consideraciones tales como vanos, resistencia a cargas verticales y horizontales, calidad de los materiales a emplear, facilidad de su consecución y construcción, influencia del tipo de suelo y clase de cimentación. Estos procesos deben ser coordinados con los profesionales de las áreas a que correspondan³².

2.3.2 Solicitaciones de carga

Se deben evaluar todas las solicitaciones de carga (muerta, viva, agua y granizo, empujes de tierra y fuerzas de viento) según los requisitos del Título B del Reglamento NSR-10.

2.3.3 Diseño sísmico

A partir de la localización de la edificación y teniendo en cuenta los mapas de zonificación sísmica del Capítulo A.2 del Reglamento NSR-10 se deben obtener:

- Los parámetros A_a y A_v que representan la aceleración y velocidad pico efectiva respectivamente expresada en términos de aceleración del sismo de diseño.
- Las características del suelo donde se ubica el proyecto a través de los coeficientes de sitio F_a y F_v .
- El coeficiente de importancia I que establece la necesidad de preservar una edificación.

³¹AIS, Op. cit., Capítulo A.1

³² SEGURA Franco, Jorge. Estructuras de Concreto I. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia, 2011. p 535

Los movimientos de diseño sísmico se expresan por medio del espectro de diseño. El reglamento contiene descripciones alternativas al sismo de diseño. A partir de los movimientos de diseño se obtienen las fuerzas sísmicas F_s .

2.3.4 Sistemas estructurales

El sistema estructural de resistencia sísmica de la edificación debe clasificarse dentro de uno de los sistemas que se indican en el Capítulo A.3 del Reglamento NSR-10:

- Sistema de muros de carga
- Sistema combinado
- Sistema de pórticos
- Sistema dual

2.3.4 Materiales estructurales

Los materiales estructurales tales como el concreto estructural, estructura metálica, mampostería estructural o estructura de madera están de alguna forma ligados a los sistemas estructurales apropiados y sus elementos estructurales de acuerdo a la resistencia requerida para los movimientos sísmicos de diseño correspondientes.³³

2.3.5 Análisis sísmico de la estructura

Se realiza aplicando los movimientos sísmicos de diseño a un modelo matemático apropiado de la estructura. Los métodos de análisis a utilizar son, de acuerdo al Capítulo A.3 del Reglamento NSR-10³⁴.

- Método de la fuerza horizontal equivalente
- Método del análisis dinámico elástico
- Método del análisis dinámico inelástico
- Método del análisis no lineal elástico de plastificación progresiva.

2.3.6 Diseño de los elementos estructurales

El diseño se debe efectuar para la combinación de las diferentes solicitaciones obteniendo las fuerzas internas de diseño de la estructura de acuerdo con los requisitos del Capítulo B.2 del Reglamento NSR-10.

³³AIS, Op. cit., Capítulo A.1

³⁴ AIS, Op. cit., Capítulo A.3

Para tener en cuenta la capacidad de disipación de energía del sistema estructural se reducen los efectos sísmicos, E , dividiendo las fuerzas sísmicas F_s por el coeficiente de capacidad de disipación de energía, R , ($E=F_s/R$). Este coeficiente se determina según la clasificación del sistema de resistencia sísmica del Capítulo A.3, del grado de irregularidad de la edificación, del grado de redundancia o ausencia de ella en el sistema y de los requisitos de diseño y detallado del material para el correspondiente grado de disipación de energía (DMI, DMO o DES)³⁵. Una vez establecidas las fuerzas internas de diseño, el diseño de los elementos estructurales se debe efectuar para los valores más desfavorables que se obtengan de las combinaciones mencionadas.

2.4 DISEÑO DE LA CIMENTACIÓN

El diseño de los elementos estructurales que componen la cimentación se obtienen utilizando los resultados de las combinaciones mencionadas en el diseño de los elementos estructurales, empleando las cargas que corresponda y las fuerzas sísmicas reducidas de diseño, E , de acuerdo a los requisitos propios del material estructural y del título H del Reglamento. En cuanto a los esfuerzos sobre el suelo de cimentación, se emplean las combinaciones de carga para el método de los esfuerzos de trabajo de la sección B.2.3 y las fuerzas sísmicas reducidas.

2.5 DISEÑO SÍSMICO DE LOS ELEMENTOS NO ESTRUCTURALES

El diseño de los elementos no estructurales debe efectuarse para cumplir el grado de desempeño superior, bueno o bajo en un todo de acuerdo al Capítulo A.9 del Reglamento NSR-10 y según el grupo de uso al cual pertenece la edificación.

En cuanto a elementos no estructurales diseñados e instalados por su fabricante o cuya instalación se hace según sus instrucciones, se debe cumplir lo indicado en la sección A.1.5.1.2 de la NSR-10.

2.6 REVISIÓN DE LOS DISEÑOS

Para efectos de obtención de licencia de construcción, los planos, memorias y estudios realizados deben ser revisados por un profesional calificado para tal fin y acogiéndose a los requisitos establecidos en la Ley 1796 de 13 de julio de 2017.

2.7 CONSTRUCCIÓN

Sin desconocer la importancia de los estudios previos, las obras preliminares y la supervisión y control, en la construcción de un proyecto, se pueden identificar tres

³⁵ FRANCO, Op. cit., p538

³⁵ FRANCO, Op. cit., p539

grandes etapas dentro de una obra: movimiento de tierras y cimentación, ejecución de estructura y acabados³⁶. El diseño, tipos de materiales, plazos y costos de cada una dependerán en gran medida del sistema constructivo escogido.

Teniendo en cuenta el alcance de la presente investigación y por ser actividades generales a cada sistema constructivo, no se abordarán generalidades respecto al movimiento de tierras, cimentación y acabados presentes en un proyecto de construcción.

A continuación, se describirán las generalidades presentes en la construcción con sistemas de construcción tradicionales (in situ) y sistemas de construcción prefabricados.

2.7.1 Componentes generales de una estructura

En términos generales, se pueden identificar y clasificar los principales elementos que componen una estructura así:

- Columnas
- Vigas
- Losas de entrepiso

2.7.1.1 Columnas

Son elementos verticales de sección constante (rectangular o circular) que soportan las cargas del resto de elementos de la estructura. Trabajan principalmente ante esfuerzos de compresión y pandeo.³⁷

Figura 1: Columnas.



Fuente. CYPE Ingenieros

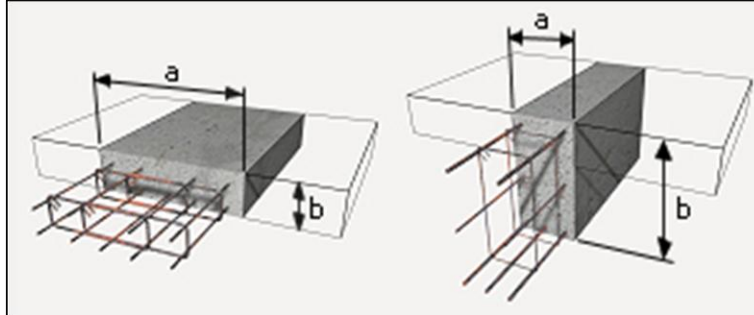
³⁶ MEDINA SANCHEZ, Eduardo. Construcción de estructuras de Hormigón Armado. Madrid : Delta, Publicaciones Universitarias, 2008, p.221

³⁷ BABU, J y MAHENDRAN, N. 4, s.l. : International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT), 2013, Vol. 2, p.291

2.7.1.2 Vigas

Son elementos horizontales de sección constante o variable en función de los esfuerzos que soporta³⁸. Están sometidas principalmente a flexión.

Figura 2: Vigas.

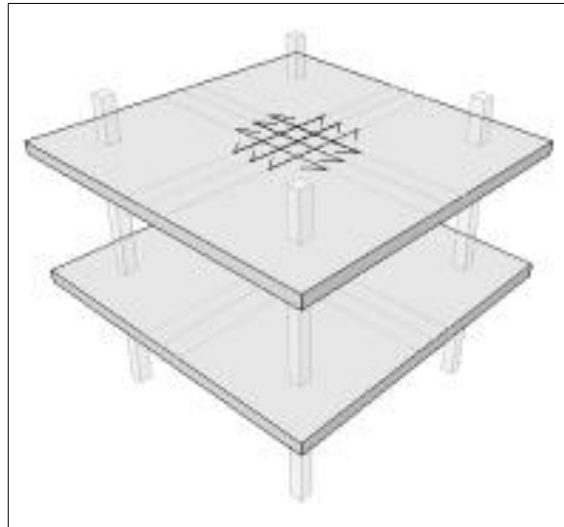


Fuente. CYPE Ingenieros

2.7.1.3 Losas de entrepiso

Son elementos que separan un piso de otro, deben ser capaces de soportar las solicitaciones de cargas muertas y vivas. Además, forman un diafragma rígido intermedio para atender a las fuerzas sísmicas en conjunto.³⁹

Figura 3: Losas de entrepiso.



Fuente. CYPE Ingenieros

³⁸ MACGREGOR, J. Reinforced concrete: Mechanics and Design. Englewood Cliffs, : Prentice-Hall, 1992.

³⁹ PARK, Robert y GAMBLE, William. Reinforced Concrete Slabs. Canada: Wiley, 2000, p.1

2.7.2 Proceso constructivo en edificios de concreto reforzado vaciado in situ

Atendiendo a cada una de las solicitudes para las cuales son diseñados los componentes del sistema estructural, el proceso lógico de ejecución de una estructura in situ, será iniciar con la construcción de columna, seguido de la ejecución del encofrado para el entrepiso (vigas y losas) y el posterior vaciado de dicho entrepiso. El proceso se repetirá tantas veces como pisos tenga la edificación.

2.7.2.1 Columnas

Se localizará y se marcará en el terreno la ubicación de cada columna, siguiendo las indicaciones de los planos estructurales. Teniendo en cuenta la altura de la columna, deberá disponerse de medios de elevación o andamios necesarios para la correcta ejecución de los trabajos y que no pongan en peligro la vida del personal que ejecuta la actividad.

El acero de refuerzo (longitudinal y transversal) deberá colocarse en longitud, distribución y diámetro estipulados en el diseño estructural.

El encofrado o formaleta, debe estar limpio y recubierto en su perímetro por algún tipo de desmoldante, que evite la adherencia del concreto endurecido con las paredes del molde. Después, se colocará y ajustará cada tablero sobre la marca trazada, buscando garantizar la sección de la columna.

Figura 4: Encofrado de Columnas.



Fuente. CYPE Ingenieros

La columna debe ser apuntalada y plomada. Para garantizar verticalidad y plomo en la columna, ésta debe estar apuntalada en tres caras de la formaleta.

El vaciado de concreto en la columna se debe ejecutar teniendo especial cuidado en que el concreto no golpee con el acero o el encofrado para evitar segregación durante la colocación; además, se deben usar vibradores para concreto que retiren el aire atrapado para evitar hormigueros. Si la altura de la columna no permite el uso de vibradores, se deben golpear las caras de las columnas con un martillo de caucho.

El curado de la columna generalmente se hace recubriendo los elementos con plásticos para evitar la pérdida de humedad.

2.7.2.2 Encofrado para vigas y losas de entrepiso

Un encofrado es una estructura temporal que le dará la forma final al entrepiso. Generalmente, están formadas por una cama (tableros de madera o metálicos), apoyos (puntales y cerchas) y riostras (diagonales).

Figura 5: Encofrado para vigas y losas.



Fuente. CYPE Ingenieros

Las losas vaciadas in situ pueden ser macizas o aligeradas, se llaman aligeradas porque usan un aligerante (madera o poliestireno expandido) para disminuir el peso e incrementar el espesor de la losa.

2.7.2.3 Armado de acero de entrepiso

La colocación del acero debe realizarse tal como lo indican los planos estructurales; el orden del armado deber ser, primero el refuerzo de las vigas, luego el refuerzo inferior de la losa y por último el refuerzo superior de la losa. Se debe garantizar en todo momento la correcta posición del acero, así como el recubrimiento.

2.7.2.4 Vaciado y curado del concreto de entrepiso

Antes del vaciado, se recomienda mojar con agua la formaleta, en especial si son de madera, para prevenir que éstas absorban agua de la mezcla afectando su manejabilidad y resistencia

Para el caso de losas aligeradas, lo primero que se funde es la torta inferior de la placa, a medida que se funde esta torta se deben colocar los casetones de aligeramiento y empezar el vaciado de vigas y viguetas. Con el vaciado de la torta inferior, vigas y viguetas, se procede a colocar el acero de refuerzo de la torta superior. Este elemento es de gran importancia, pues ante la acción de las fuerzas de sismo, actuará como diafragma rígido permitiendo la adecuada repartición de cargas entre los demás elementos de la estructura. Una vez finalizado el vaciado se debe nivelar y afinar la losa para dar el acabado final.

Figura 6: Vaciado Losa.



Fuente. RSA Constructores

El curado de la placa debe hacerse mediante riego periódico de agua y durante por lo menos 7 días, manteniendo la humedad en toda la losa, garantizando que ésta gane la resistencia de diseño y evitando que se produzcan fisuras en la superficie por pérdida de humedad.

2.7.3 Proceso constructivo en edificios de concreto reforzado prefabricado

Partiendo de los componentes generales de una estructura (columnas, vigas y losas), una gran variedad de productos pueden derivarse usando concreto prefabricado según sea el tipo y uso de la estructura que se planea ejecutar⁴⁰.

⁴⁰ PRECAST/PRESTRESSED CONCRETE INSTITUTE. About Precast Materials and Methods. 2010, p.1

Figura 7: Estructura prefabricada Cinemark Lima.



Fuente. PREANSA Perú

Una edificación de este tipo, debe proyectarse correctamente en función de los elementos prefabricados que la componen; desde el proyecto arquitectónico y estructural deben conocerse las propiedades, dimensiones, localización, consideraciones de fabricación y montaje para evitar que se incurra en sobrecostos y demoras.

A partir de la coordinación de diseños, los elementos prefabricados se ejecutan en una fábrica o taller, se transportan al sitio del proyecto y se montan o instalan en la ubicación establecida en los planos.

A diferencia de una estructura tradicional, los elementos de una edificación prefabricada pueden fabricarse todos al tiempo o por etapas, dependiendo de los cronogramas de construcción y de la capacidad de operación y almacenaje de las planta de prefabricación.⁴¹

Buscando hacer comparativos los diferentes procesos entre un sistema u otro, a continuación se abordaran los procesos de prefabricación y montaje de los elementos descritos en el proceso tradicional.

2.7.3.1 La fábrica de prefabricados

Una planta de prefabricados puede compararse análogamente a una obra; es un lugar especializado donde se ubican los equipos, moldes, materiales y mano de obra especializadas para la elaboración de los prefabricados.⁴²

⁴¹ MADUEÑO DÍAZ, José Manuel. Evaluación económica de obras con prefabricados. Bogotá : ASOCRETO, 2015, p.24

⁴² ASOCIACIÓN NACIONAL DE LA INDUSTRIAL DEL PREFABRICADO DE HORMIGÓN ANDECE. Inicio, Prefabricados de Hormigón. [En línea] 2017. <https://www.andece.org/prefabricados-de-hormigon.html>.

Figura 8: Planta de Prefabricados en Madrid, Cundinamarca.



Fuente. PREANSA Colombia

En ocasiones, cuando por limitaciones de las vías del territorio, no es posible transportar los elementos, se plantean plantas móviles en el sitio de la obra con las mismas condiciones de control de una planta de elementos prefabricados fija.

2.7.3.2 Columnas

La longitud de las columnas dependerá de las necesidades de cada proyecto y de las limitaciones viales para su transporte. El armado de acero, encofrado y vaciado de una columna se ejecuta de forma horizontal, utilizando únicamente 3 caras de la columna para molde⁴³. En los extremos de los elementos se deja el acero expuesto para la posterior conexión con la fundación o, si es el caso, dar continuidad en altura a la edificación.

Figura 9: Molde para columnas.



Fuente. Moldtech

⁴³ PRECAST/PRESTRESSED CONCRETE INSTITUTE. Beams and Columns. 7, 2010, p.1

Figura 10: Columna Prefabricada



Fuente. PCI (Precast Concrete Institute)

Figura 11: Izaje de Columna Prefabricada.



Fuente. Zona Franca de Occidente.

2.7.3.3 Vigas

Existen diferentes secciones aplicables a las vigas prefabricadas en función de las solicitaciones de carga, de su uso y de los elementos que vayan a apoyar. El proceso de fabricación es similar a las columnas, varía únicamente en función de su longitud o luz ya pueden ser armadas o pretensadas⁴⁴.

⁴⁴ PRECAST/PRESTRESSED CONCRETE INSTITUTE. Op. cit., p.1

Figura 12: Viga para estructuras de entrepiso.



Fuente. Archiexpo

En estructuras de entrepiso, las vigas prefabricadas se apoyan sobre ménsulas previstas en las columnas.

Figura 13: Izaje y montaje de viga prefabricada.



Fuente. PREANSA Perú

2.7.3.4 Losas de entrepiso

Son elementos pretensados con una excelente capacidad de carga y eficiencia estructural que permiten cubrir grandes superficies con menos columnas; como en las vigas prefabricadas, en losas de entrepiso encontramos diferentes tipos de losas, diferenciándose cada una en las cargas que puedan soportar y en la luz entre

apoyos que deban cubrir ⁴⁵. Entre los tipos más comunes de losas prefabricadas se tienen, losas doble tees, losas alveolares y losas sólidas.

Figura 14. Almacenamiento Losa Doble T.



Fuente. PCI (Precast Concrete Institute)

Doble Tees

Llamadas así por su forma, son los elementos prefabricados que más se asemejan a un entrepiso vaciado in situ, en algunos ámbitos llamadas Losas Pi por su semejanza a la letra griega π . Son usadas principalmente como componente de cubierta y entrepiso para cualquier tipo de estructura

Estos elementos llegan a un ancho de máximo 2.50m para facilidad en el transporte y manejan alturas desde 20cm hasta 60cm.

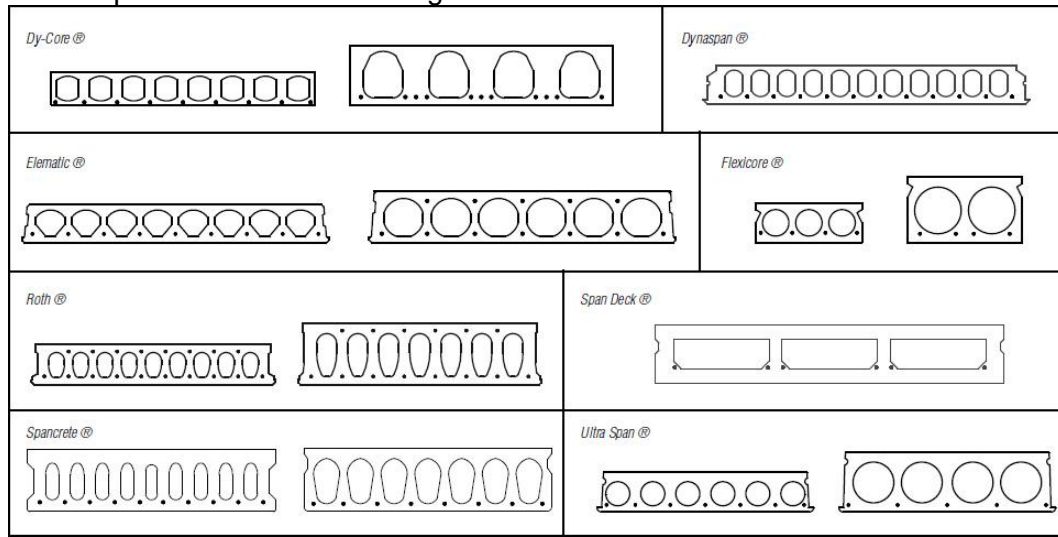
Losa Alveolar

Se utilizan principalmente para entrepiso y cubiertas en edificaciones de vivienda, hoteles, oficinas, escuelas y prisiones. El ancho típico de estos elementos es de 60, 120 y 240cm y su espesor, varía desde los 15cm a los 40cm.

Cada productor de losas alveolar, tiene un proceso de marca registrada con el que crea diferentes formas para formar los vacíos dentro de las piezas.

⁴⁵ PRECAST/PRESTRESSED CONCRETE INSTITUTE. Floors and Roofs. 7, 2010.

Figura 15. Tipos de Losa Alveolar según fabricantes en Estados Unidos.



Fuente. PCI (Precast Concrete Institute)

Losas macizas

Se utilizan principalmente como componentes de cubiertas. Pueden fabricarse pretensadas o reforzadas. Los tamaños pueden variar para satisfacer los diferentes requisitos estructurales.

Su ancho varía entre el 1.20m y los 2.40m y pueden tener espesores entre los 10cm y 30cm.

Figura 16. Izaje losa maciza.



Fuente. PCI (Precast Concrete Institute)

2.7.3.5 Transporte y montaje

Como se mencionaba, el transporte de los elementos prefabricados dependerá del diseño geométrico de las vías del país y de la disponibilidad de camiones de las empresas transportistas⁴⁶. El transporte de algunos elementos prefabricados, por su geometría y peso, debe ser transportado en camiones extensibles y en equipos modulares tipo Dolly. No se deben olvidar los permisos especiales y escoltas requeridos según la normativa del Ministerio de transporte para el manejo de cargas extradimensionadas.

El montaje de la estructura se hace con grúas telescópicas. Se deben prever siempre y quedar embebidos, todos los elementos de conexión entre fundación, vigas, articulaciones o fachadas. También se deben tener en cuenta, equipos de elevación o andamios para proporcionar seguridad a los operarios durante el proceso de montaje.

⁴⁶ PRECAST/PRESTRESSED CONCRETE INSTITUTE. Transportation Design Resources. 7, 2010.

3. DIFERENCIAS CUALITATIVAS ENTRE SISTEMAS CONSTRUCTIVOS

El presente capítulo se desarrolla en dos fases; la primera, corresponde a la revisión de bibliografía referente a las diferencias entre sistemas constructivos abordadas por diferentes autores y, la segunda, la diferenciación cualitativa entre los sistemas tradicionales y los sistemas prefabricados a partir de la revisión bibliográfica de la primera fase, de las consideraciones frente al tema del Reglamento de construcción sismo resistente NSR-10, de consultas realizadas a expertos en cada uno de los sistemas y de la experiencia personal del autor.

Los resultados, se presentarán en una matriz llamada, Matriz de diferencias cualitativas, en la que se reúnen los aspectos más importantes en cuanto a ventajas y desventajas, entre uno y otro sistema y que posteriormente se evaluarán junto a la calificación cuantitativa elaborada en un capítulo posterior.

A partir de los aspectos que se enumeran a continuación, se evaluará si el uso de sistemas tradicionales o prefabricados presentan una condición favorable o, si el ámbito de aplicación es indiferente al aspecto evaluado.

1. Estudios geotécnicos
2. Diseño arquitectónico
3. Diseños preliminares
4. Solicitaciones de carga
5. Diseño sísmico
6. Materiales estructurales
7. Análisis sísmico de la estructura
8. Diseño elementos estructurales
9. Diseño de la cimentación
10. Ejecución de los diseños
11. Actividades Preliminares y preparación de terreno
12. Movimiento de tierras
13. Inicio de construcción
14. Costo Directo
15. Duración de proyecto
16. Sobre costos
17. Seguridad industrial
18. Calidad de los materiales
19. Estabilidad ante desastres naturales
20. Durabilidad y mantenimiento
21. Sustentabilidad

La evaluación se realizará a partir de la definición de cadena valor de Porter; ésta consiste en una herramienta gerencial para la toma de decisiones y busca

caracterizar fuentes de ventaja competitiva, identificando condiciones favorables o desfavorables dentro de un proceso en específico.⁴⁷

Una cadena de valor está integrada por actividades primarias o fundamentales y, secundarias o de apoyo; para el desarrollo del presente trabajo, se clasificarán los aspectos mencionados anteriormente, dentro de los procesos de diseño y construcción, y a su vez, estos aspectos se diferenciarán entre primarios o secundarios; serán primarios si sus resultados se consideran esenciales dentro de la ejecución de un proyecto y serán secundarios cuando se consideren de apoyo a los procesos fundamentales. Dicho de otro modo, basados en la definición de cadena de valor, para los 21 aspectos a evaluar se establecerán parámetros de priorización de actividades, teniendo en cuenta su grado de importancia.

La definición de priorización de actividades, se basa en el método Delphi, que es una técnica de obtención de información, soportada en la consulta a expertos de un área específica, con el fin de obtener la opinión de consenso más fiable del grupo consultado. Esta técnica, de carácter cualitativo, es usada cuando no se cuenta con información suficiente para la toma de decisiones, ante situaciones de incertidumbre o cuando se carece de información objetiva.⁴⁸

A partir de lo anterior, se elabora la siguiente cadena de valor, estableciendo actividades primarias y secundarias y, asignando un porcentaje de importancia a cada aspecto dentro de la cadena.

Figura 17. Cadena de valor de aspectos a evaluar

ACTIVIDADES SECUNDARIAS	Estudios geotécnicos	2.5%	Ejecución de los diseños	2.5%
	Diseño arquitectónico	2.5%	Actividades Preliminares y preparación de terreno	2.5%
	Solicitaciones de carga	2.5%	Movimiento de tierras	2.5%
	Diseños preliminares	2.5%	Inicio de construcción	2.5%
	Materiales estructurales	2.5%	Sobre costos	2.5%
	Análisis sísmico de la estructura	2.5%	Seguridad industrial	2.5%
	Calidad de los materiales	2.5%	Durabilidad y mantenimiento	2.5%
	Estabilidad ante desastres naturales	2.5%	Sustentabilidad	2.5%
ACTIVIDADES PRIMARIAS	Diseño sísmico	10%	Costo Directo	15%
	Diseño elementos estructurales	10%	Duración de proyecto	15%
	Diseño de la cimentación	10%		
	DISEÑO	50%	CONSTRUCCION	50%

Fuente. El Autor

⁴⁷ RODRÍGUEZ CASTILLEJO, Walter. Gerencia de Construcción y del tiempo-costo. Lima: Macro E.I.R.L., 2013. 978-613304-102-1. p. 543

⁴⁸ REGUANT ÁLVAREZ, Mercedes y TORRADO FONSECA, Mercedes. El método Delphi. Barcelona: REIRE, 2016. 2013-2255. p.87

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos en la Matriz de diferencias cualitativas y los parámetros de prioridad anteriormente definidos, éstos se compararán a partir de la relación $\frac{\% \text{ condiciones favorables Concreto Prefabricado}}{\% \text{ condiciones favorables Concreto In Situ}}$, definiendo así, el sistema que represente mayor ventaja, teniendo en cuenta que si el cociente es menor que la unidad, se considera a favor el uso de sistemas tradicionales y viceversa para el caso de sistemas prefabricados. Se llamará a esta relación, Indicador de diferencias cualitativas, I_{DC}

Tabla 1: Matriz de diferencias cualitativas

Aspecto	Concreto In Situ	Concreto Prefabricado	Condición favorable
1. Estudios geotécnicos	Se debe realizar una exploración e interpretación técnica del subsuelo para suministrar los parámetros y recomendaciones de diseño y construcción de cimentación de la edificación según las indicaciones del Título H del Reglamento NSR-10	Se debe realizar una exploración e interpretación técnica del subsuelo para suministrar los parámetros y recomendaciones de diseño y construcción de cimentación de la edificación según las indicaciones del Título H del Reglamento NSR-10	Igual en ambos sistemas
2. Diseño arquitectónico	<p>Permite diseños con formas circulares, voladizos y retrocesos en fachadas dando apariencia de mejor estética a la estructura.</p> <p>En estructuras de concreto reforzado, las luces de vigas generalmente son hasta de 8 metros, generando mayor cantidad de columnas y reduciendo espacios.</p>	<p>En la mayoría de los casos los diseños son ortogonales; la ejecución de voladizos o retrocesos en fachadas, sólo es posible con la ejecución de actividades in situ.</p> <p>Permite la fabricación en planta de elementos pretensados que pueden alcanzar grandes longitudes, reduciendo el número de columnas y aportando mayor espacio al diseño arquitectónico.</p>	Concreto In Situ
3. Diseños preliminares	<p>Se define el sistema estructural de la edificación. El sistema estructural que estará ligado al material estructural de la edificación.</p> <p>Se establecen dimensiones, formas preliminares y solicitaciones de carga</p>	<p>Se define el sistema estructural de la edificación. El sistema estructural que estará ligado al material estructural de la edificación.</p> <p>Se establecen dimensiones, formas preliminares y solicitaciones de carga</p>	Igual en ambos sistemas

	iniciales de los elementos estructurales en la edificación.	iniciales de los elementos estructurales en la edificación.	
4. Solicitaciones de carga	Se evalúan todas las cargas que puedan afectar la edificación según las indicaciones del Título B del Reglamento NSR-10.	Se evalúan todas las cargas que puedan afectar la edificación según las indicaciones del Título B del Reglamento NSR-10.	Igual en ambos sistemas
5. Diseño sísmico	<p>- Se definen la amenaza sísmica del proyecto a partir del lugar donde se construirá la edificación.</p> <p>- Se definen los movimientos sísmicos de diseño de acuerdo a la amenaza sísmica, las características del suelo y la importancia de la edificación.</p>	<p>- Se definen la amenaza sísmica del proyecto a partir del lugar donde se construirá la edificación.</p> <p>- Se definen los movimientos sísmicos de diseño de acuerdo a la amenaza sísmica, las características del suelo y la importancia de la edificación.</p>	Igual en ambos sistemas
6. Materiales estructurales	<p>El material estructural es el concreto.</p> <p>Se logran resistencias a la compresión f'_c a los 28 días de hasta 28MPa.</p> <p>Según las características del proyecto se puede recurrir al uso de concreto postensado.</p>	<p>El material estructural es el concreto.</p> <p>Por las características de los elementos y necesidades de fabricación se pueden alcanzar resistencias a la compresión f'_c a los 28 días de 50MPa.</p> <p>En función de las cargas y la luz entre apoyos, los elementos como vigas y losas de entrepiso son de concreto pretensado.</p>	Concreto prefabricado
7. Análisis sísmico de la estructura	Se realiza aplicando los movimientos de diseño a un modelo matemático aceptado.	Se realiza aplicando los movimientos de diseño a un modelo matemático aceptado.	Igual en ambos sistemas

8. Diseño elementos estructurales	<ul style="list-style-type: none"> - Se efectúan las combinaciones de carga definidas en el Título B del Reglamento NSR-10. - Para tener en cuenta la capacidad de disipación de energía de los elementos estructurales se reducen los efectos sísmicos E, dividiendo las fuerzas sísmicas F_s por el coeficiente de capacidad de disipación de energía, R, ($E=F_s/R$). - El valor R para sistemas con concreto in situ varía entre 2.50 y 7.00 	<ul style="list-style-type: none"> - Se efectúan las combinaciones de carga definidas en el Título B del Reglamento NSR-10. - Para tener en cuenta la capacidad de disipación de energía de los elementos estructurales se reducen los efectos sísmicos E, dividiendo las fuerzas sísmicas F_s por el coeficiente de capacidad de disipación de energía, R, ($E=F_s/R$). - El valor R para sistemas en concreto prefabricado es únicamente 1.50 	Concreto In Situ
9. Diseño de la cimentación	Se usan los resultados obtenidos del diseño de elementos estructurales teniendo en cuenta los requisitos del Título H del Reglamento NSR-10	Se usan los resultados obtenidos del diseño de elementos estructurales teniendo en cuenta los requisitos del Título H del Reglamento NSR-10	Igual en ambos sistemas
10. Ejecución de los diseños	La construcción de la estructura no es ejecutada por el Diseñador.	La empresa de prefabricados se encarga de los diseños, la fabricación, transporte y montaje de los elementos prefabricados	Concreto prefabricado
11. Actividades Preliminares y preparación de terreno	Se deben adecuar las instalaciones provisionales y vías de acceso según las necesidades del proyecto.	<p>Se deben adecuar las instalaciones provisionales y vías de acceso según las necesidades del proyecto.</p> <p>Se debe preparar el terreno para el acceso de grúas telescópicas que realizarán las maniobras de montaje.</p>	Igual en ambos sistemas
12. Movimiento de tierras	Se seguirán las indicaciones establecidas por el Ingeniero Geotecnista en el estudio de suelos.	Se seguirán las indicaciones establecidas por el Ingeniero Geotecnista en el estudio de suelos.	Igual en ambos sistemas

13. Inicio de construcción	Se requieren actividades predecesoras para el inicio de la estructura tales como movimiento de tierras, instalaciones subterráneas y cimentación	El inicio de fabricación de los elementos, de acuerdo a la contratación, puede llegar a ser el día 0 del proyecto.	Concreto prefabricado
14. Costo Directo	- El costo directo por m ² es altamente competitivo frente al uso de otros materiales estructurales como el acero.	- El costo directo por m ² es mayor frente a otros materiales como el acero e incluso, como el mismo concreto in situ.	Concreto In Situ
15. Duración de proyecto	<p>Proceso consecutivo de actividades limitadas por sistemas de formaleta que en la mayoría de los casos deben permanecer durante 28 días manteniendo ocupada la zona de trabajo evitando el inicio de actividades posteriores.</p> <p>El avance de obra es en sentido horizontal</p>	<p>Las actividades inician en cualquier momento en fábrica independiente del proceso constructivo que se ejecute en el mismo instante en la obra.</p> <p>Al iniciar las actividades de montaje, entre el 80% y 100% de los elementos estructurales ya están fabricados y listos para instalar.</p> <p>Los elementos estructurales son autoportantes, lo que hace innecesario el uso de formaletas, manteniendo despejadas las zonas para el resto de actividades del proyecto.</p> <p>El avance del proyecto se da en sentido vertical.</p>	Concreto prefabricado
16. Sobre costos	- El incumplimiento generalizado de plazos genera desviaciones en los costos indirectos de construcción.	- Salvo cambios posteriores al diseño definitivo, se consideran presupuestos cerrados que mantienen controlada la inversión de principio a fin.	Concreto prefabricado

17. Seguridad industrial	En el desarrollo de las actividades, todo el personal operativo debe realizar trabajos en altura.	<p>La fabricación de los elementos se realiza en forma horizontal.</p> <p>El montaje de los prefabricados se realiza con equipos telescópicos especializados para estas actividades y con un número de personal mínimo para la instalación.</p>	Concreto prefabricado
18. Calidad	Incertidumbre en los procesos de calidad durante el mezclado, el vaciado y el curado del concreto.	Los elementos se elaboran en una fábrica mediante procesos industriales lo que implica patrones y controles estrictos durante todo el proceso de producción	Concreto prefabricado
19. Estabilidad ante desastres naturales	<p>- Fuego: con el adecuado manejo de recubrimientos el concreto, sin necesidad protecciones adicionales se comporta muy bien frente al fuego.</p> <p>- Sismos: Siguiendo las indicaciones del Reglamento NSR-10, estas estructuras ante temblores fuertes pueden presentar daño en los elementos estructurales pero sin colapso total de la estructura.</p>	<p>- Fuego: con el adecuado manejo de recubrimientos el concreto, sin necesidad protecciones adicionales se comporta muy bien frente al fuego.</p> <p>- Sismos: comportamiento sin colapso comprobado en sismos de alta magnitud en América. Sismo de Concepción (Chile) en 2010, 8.8 en la escala de Richter. Sismo de Chiapas (México) en 2017, 8.2 en la escala de Richter.</p>	Igual en ambos sistemas
20. Durabilidad y mantenimiento	La vida útil de una estructura de concreto, sometida a condiciones normales, puede llegar a los 100 años.	La vida útil de una estructura de concreto, sometida a condiciones normales, puede llegar a los 100 años.	Igual en ambos sistemas
21. Sostenibilidad	<p>Construcción con alta generación de residuos (escombros).</p> <p>Alta contaminación auditiva en las obras al personal</p>	<p>Por el estricto plan de calidad en las fábricas la generación de residuos es mínima.</p> <p>Cero generación de escombros producto de la</p>	Concreto prefabricado

	operativo y a la comunidad vecina.	<p>estructura</p> <p>Mínima generación de ruido durante el montaje o instalación de los elementos estructurales.</p> <p>Sin adecuado mantenimiento mecánico, los vehículos que transportan los elementos prefabricados pueden generar altas emisiones de CO₂.</p>	
--	------------------------------------	--	--

Fuente. El Autor

3.1 RESULTADOS

A partir del grado de importancia de cada aspecto evaluado y de la Matriz de diferencias cualitativas, se obtiene la siguiente tabla, que permitirá evidenciar qué sistema constructivo se considera más favorable en su aplicación en la construcción de edificaciones en el ámbito nacional.

Tabla 2. Resultados evaluación cualitativa.

No.	Aspecto	Condición favorable	Grado de importancia	
			Concreto in situ	Concreto prefabricado
1	Estudios geotécnicos	Igual en ambos sistemas	2.5%	2.5%
2	Diseño arquitectónico	Concreto In Situ	2.5%	0.0%
3	Diseños preliminares	Igual en ambos sistemas	2.5%	2.5%
4	Solicitaciones de carga	Igual en ambos sistemas	2.5%	2.5%
5	Diseño sísmico	Igual en ambos sistemas	10.0%	10.0%
6	Materiales estructurales	Concreto prefabricado	0.0%	2.5%
7	Análisis sísmico de la estructura	Igual en ambos sistemas	2.5%	2.5%
8	Diseño elementos estructurales	Concreto In Situ	10.0%	0.0%
9	Diseño de la cimentación	Igual en ambos sistemas	10.0%	10.0%
10	Ejecución de los diseños	Concreto prefabricado	0.0%	2.5%
11	Actividades Preliminares y preparación de terreno	Igual en ambos sistemas	2.5%	2.5%
12	Movimiento de tierras	Igual en ambos sistemas	2.5%	2.5%
13	Inicio de construcción	Concreto prefabricado	0.0%	2.5%
14	Costo Directo	Concreto In Situ	15.0%	0.0%
15	Duración de proyecto	Concreto prefabricado	0.0%	15.0%
16	Sobre costos	Concreto prefabricado	0.0%	2.5%
17	Seguridad industrial	Concreto prefabricado	0.0%	2.5%
18	Calidad de los materiales	Concreto prefabricado	0.0%	2.5%
19	Estabilidad ante desastres naturales	Igual en ambos sistemas	2.5%	2.5%
20	Durabilidad y mantenimiento	Igual en ambos sistemas	2.5%	2.5%
21	Sustentabilidad	Concreto prefabricado	0.0%	2.5%
Total			67.5%	72.5%

Fuente. El Autor

Según lo anterior se tiene que, para 21 aspectos evaluados y en una escala de importancia de 0 a 100%, el concreto prefabricado cuenta con el 72.5% de condiciones favorables, mientras que para el concreto in situ se tiene el 67.5% de condiciones favorables.

Aplicando la relación definida con anterioridad:

$$I_{DC} = \frac{\% \text{ condiciones favorables Concreto Prefabricado}}{\% \text{ condiciones favorables Concreto In Situ}} = \frac{72.5}{67.5} = 1.07$$

Dicho esto, el I_{DC} , representa un valor mayor que la unidad, lo cual se traduciría en una ventaja el usar elementos prefabricados en la construcción.

4. CASO DE ESTUDIO

Para lograr la comparación entre los procesos de diseño y construcción entre los sistemas in situ y prefabricado, se analizarán con un ejemplo práctico las variables que intervienen en un proyecto construido con losas de entrepiso prefabricadas tipo losa alveolar y losa maciza (**Caso A**) y el mismo proyecto pero construido con métodos tradicionales tipo losa de entrepiso in situ nervada o aligerada (**Caso B**)

El desarrollo del caso de estudio, se basará en un proyecto que se construye dentro de un importante centro empresarial ubicado en la Calle 26 al occidente de la ciudad de Bogotá. Los planos e información general de este proyecto han sido cortesía de la Ingeniera Ana María Suárez, Ingeniera estructural de la compañía Titán Cemento, y se encuentran contenidos en el Anexo A del presente documento.

Teniendo en cuenta que la edificación está originalmente proyectada con elementos prefabricados, para el Caso A se utilizará dicha información para sustentar los análisis correspondientes. Para el Caso B, cuando sea necesario, consideraciones, diseños, etc., serán de autoría propia.

Figura 18: Localización proyecto caso de estudio.



Fuente. Portal de Mapas de Bogotá y Autor

4.1 DESCRIPCIÓN DE LA EDIFICACIÓN

La edificación consta de 3 niveles y un sótano; la estructura la componen columnas, vigas y un muro de contención perimetral en el sótano. Las alturas libres son de 3.54m en sótano, 4.40m en el nivel 1 y 3.80m en el nivel 2 y 3. La superficie aproximada del piso tipo es de 2,600m².

La estructura corresponde a pórticos (vigas – columnas) de concreto prefabricado que resisten las cargas gravitacionales de la estructura, en conjunto con muros de concreto fundido en sitio que aportan la resistencia sísmica del edificio.

Las dimensiones de los principales elementos resistentes son: columnas de 50 x 50 cm, vigas prefabricadas pretensadas de 45 x 60 cm y de 50 x 60 cm para los pisos superiores, y vigas prefabricadas sin pretensado 45 x 80 cm más vigas in situ 30 x 27 cm para el cielo sótano. Los muros son de 25 cm de espesor.

Las columnas se consideran rotuladas en su base y para efectos sísmicos las vigas se consideran rotuladas en uno de sus extremos. Como se mencionaba, la resistencia sísmica del edificio es aportada por los muros, los cuales se construyen de manera monolítica, considerándose así, según el Reglamento NSR-10, un factor de reducción sísmica $R_0 = 5$.

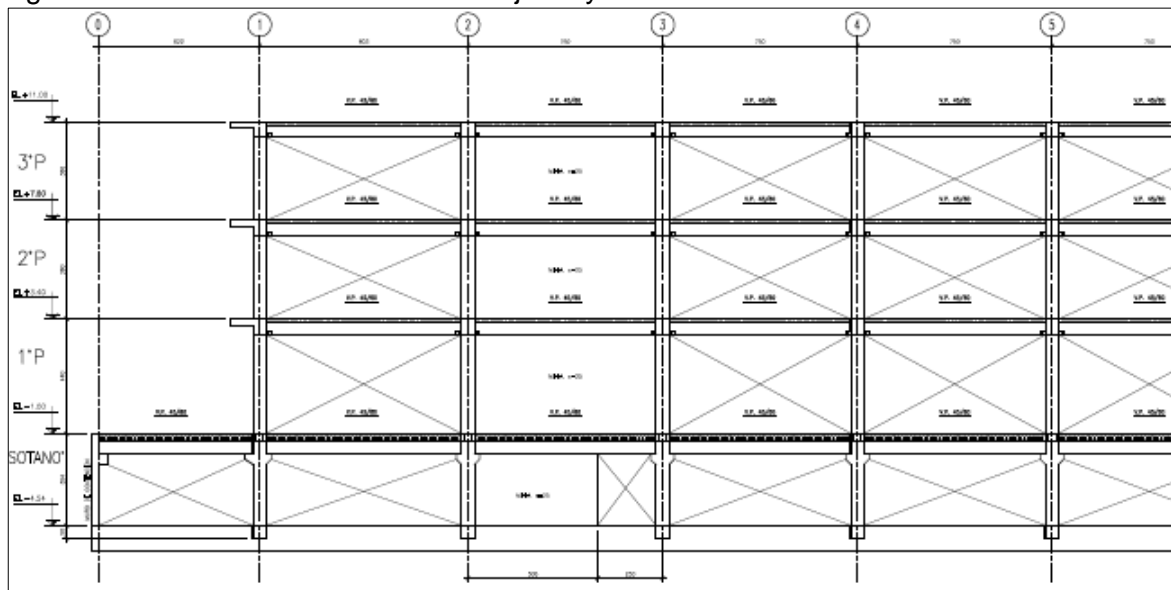
4.2 CASO A – LOSA DE ENTREPISO PREFABICADA

4.2.1 Definición del sistema de entrepiso prefabricado

4.2.1.1 Losa de Sótano

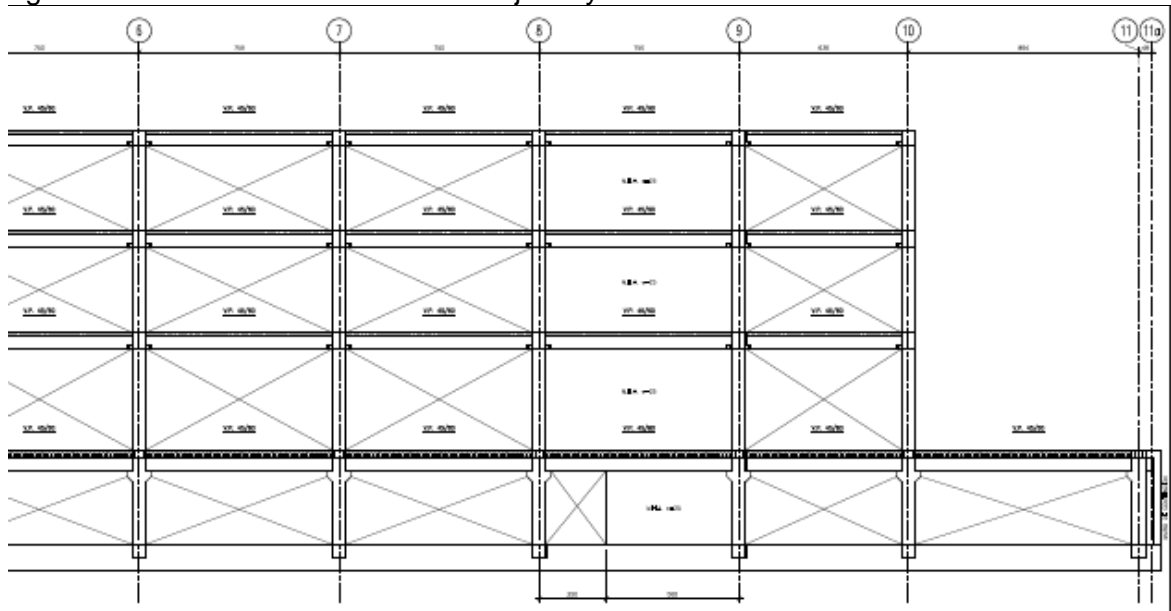
La altura libre requerida permite usar un sistema de vigas portantes de 80cm de altura que cargan las losas alveolares.

Figura 19: Elevación edificación entre ejes 0 y 5. Ver Anexo A.



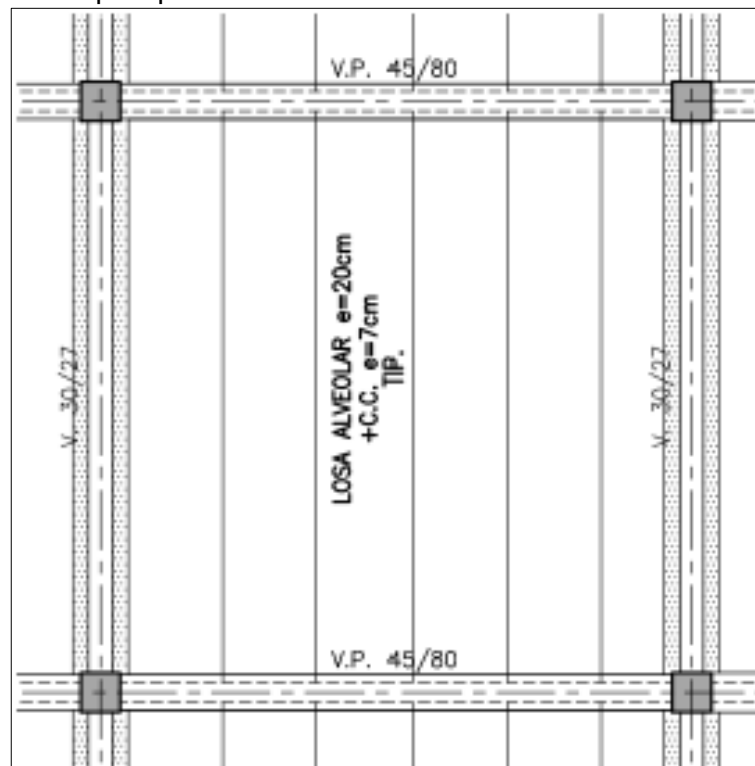
Fuente. Ana María Suárez (Ingeniera estructural de la compañía Titán Cemento)

Figura 20: Elevación edificación entre ejes 5 y 11. Ver Anexo A



Fuente. Ana María Suárez (Ingeniera estructural de la compañía Titán Cemento)

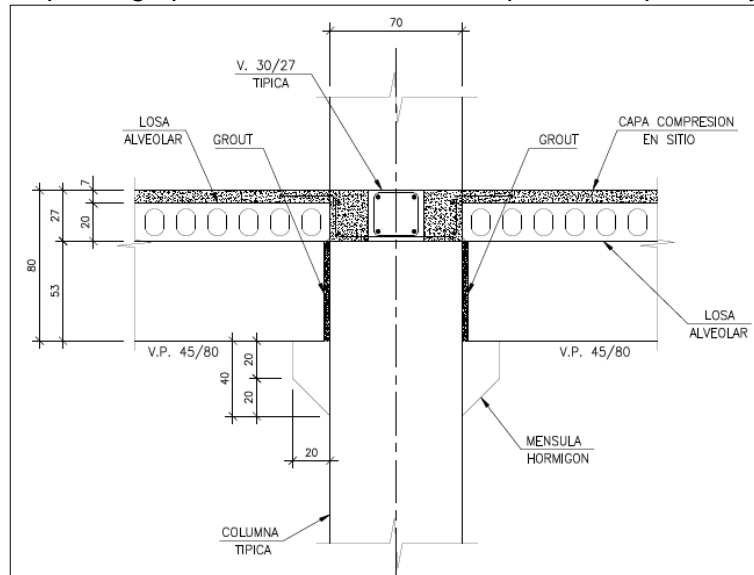
Figura 21: Sistema de piso para Cielo Sótano.



Fuente. Ana María Suárez (Ingeniera estructural de la compañía Titán Cemento)

En la otra dirección de análisis se considera una viga fundida en sitio que prácticamente no recibe descarga del sistema de piso, por lo que una altura de viga igual al espesor del sistema de losa basta, considerando que ésta sólo pretende aportar rigidez al pórtico.

Figura 22. Detalle típico viga portante, losa alveolar, capa de compresión y viga de rigidez.



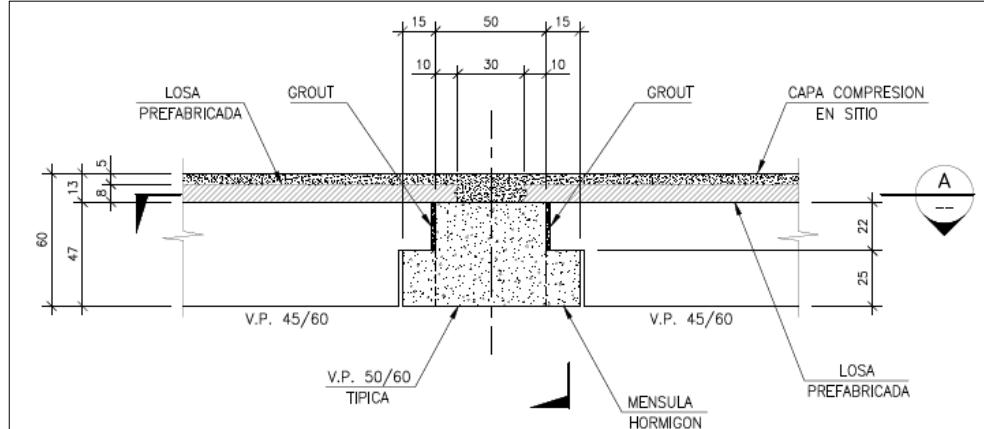
Fuente. Ana María Suárez (Ingeniera estructural de la compañía Titán Cemento)

En este piso la estructura está conectada al muro de contención. El muro de contención va a ser el elemento que tome el esfuerzo sísmico en este piso debido a su alta rigidez lateral. El sistema constructivo para ejecutar la unión entre la capa de compresión y el muro de contención consiste en dejar el coronamiento del muro sin concreto, con rugosidad, para posteriormente incorporar el refuerzo adicional que sea necesario y fundir la capa de compresión en conjunto con el coronamiento del muro. Este tipo de unión genera un traspaso monolítico de cortante del muro a la capa de compresión.

4.2.1.1 Losa Piso Tipo

La altura libre de piso, limita la altura de las vigas portantes a 60 cm. Con el objetivo de tener un sistema de piso eficiente, se consideran vigas pretensadas de esta altura (VP 45/60) que portan losas prefabricadas macizas de 8cm de espesor. Estas vigas se apoyan sobre la columna o en los tercios de vigas de la misma altura (VP 50/60).

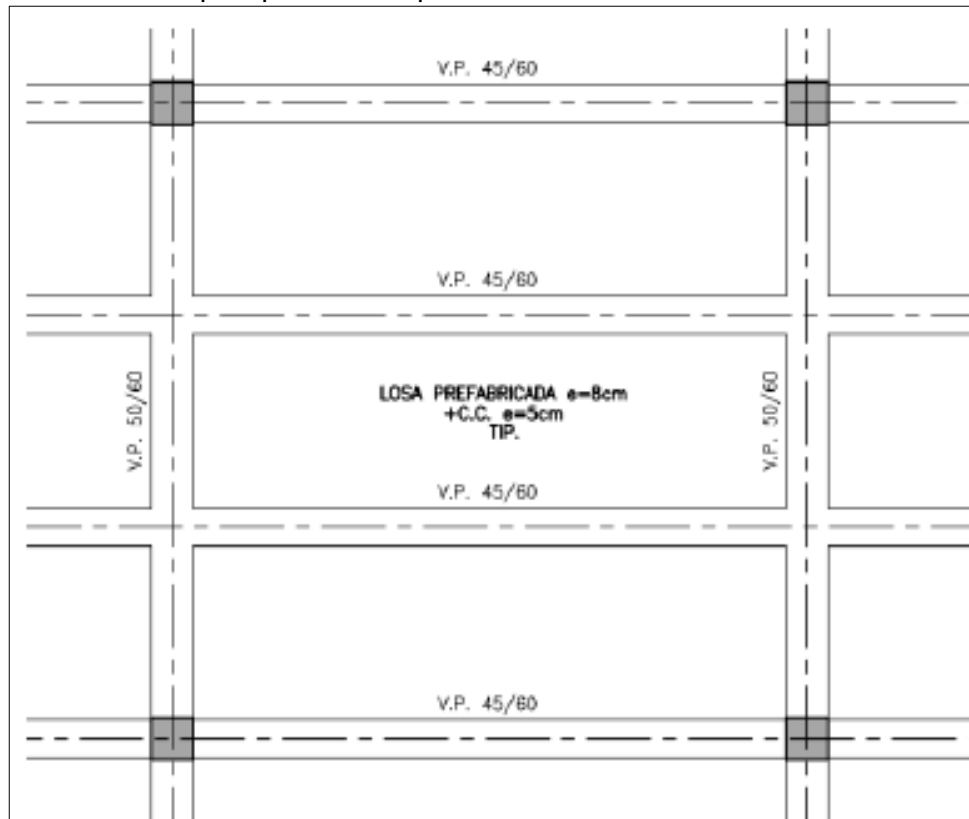
Figura 23. Detalle típico viga portante, losa maciza y capa de compresión.



Fuente. Ana María Suárez (Ingeniera estructural de la compañía Titán Cemento)

Los muros otorgan la resistencia sísmica al edificio, y el esfuerzo cortante que pasa a través de ellos proviene, principalmente, de la fuerza inercial del sistema de piso. El cortante se traspasa a los muros mediante la capa de compresión de 5 cm de los pisos 1 y 2; sin embargo, en el caso del piso 3, este espesor no es suficiente y se debe aumentar la capa de compresión a 8 cm para resistir el esfuerzo.

Figura 24. Sistema de piso para Piso Tipo.



Fuente. Ana María Suárez (Ingeniera estructural de la compañía Titán Cemento)

4.2.2 Cargas

Las cargas consideradas para el análisis de este Caso son:

- Carga permanente adicional al peso de la estructura de 280 kg/m^2 para oficinas con particiones móviles y de 280 kg/m^2 para cubierta.
- Carga de uso de 200 kg/m^2 para oficinas.
- Carga de uso de techo de 100 kg/m^2 .

4.2.3 Materiales

Para los elementos de losa de entrepiso, se considerará una resistencia a la compresión $f'c$ a los 28 días de 40 MPa , contemplando tener una estructura durable y resistente ante todas las solicitaciones a las que se vea expuesta tanto en la etapa de fabricación, montaje y uso.

Tabla 3: Materiales en Caso A

Elemento	Resistencia
Concreto losa alveolar – $f'c$	40 MPa
Concreto losa maciza – $f'c$	40 MPa
Acero de refuerzo - f_y	420 MPa
Acero de tensionamiento - f_{pu}	1860 MPa

Fuente. El Autor

4.2.4 Proceso de fabricación, transporte y montaje

4.2.4.1 Fabricación

Las losas prefabricadas se fabrican con anchos estándar que permitan el uso de camiones normales para su transporte, usualmente esas dimensiones son de 60 cm , 120 cm o 240 cm .

Las losas se fabrican sobre pistas de acero. Cada pista y sus moldes, son limpiados con desmoldante o desencofrante que evita que se adhiera el concreto una vez endurecido a la formaleta.

Para las losas alveolares, luego del alistamiento de la pista, se procede a la extensión de los alambres o torones, los cuales son anclados en los extremos de las placas. La tensión en los cables es aplicada por un gato hidráulico con la capacidad que se requiera según el diseño respectivo.

Figura 25. Pista de fabricación losas alveolares



Fuente. Titán Cemento

Una vez que el acero se encuentra tensado, se sitúa la máquina moldeadora sobre los carriles de la pista. Esta máquina recibe el concreto en sus tolvas, donde lo va vibrando y compactando. Al tiempo que la máquina avanza va depositando el concreto con la forma y dimensiones que corresponden a la placa alveolar que se está fabricando.

La mezcla de concreto utilizada en el proceso de fabricación de la placa es de consistencia muy seca con una relación agua-cemento menor de 0.4, lo cual permite que el moldeado de la placa no se derrumbe a pesar de quedar sin soportes laterales.

Figura 26. Máquina moldeadora de losas alveolares.



Fuente. Titán Cemento

El curado se realiza mediante transferencia de calor de la pista al concreto con un estricto control de temperatura. Con el fin de conservar la humedad y temperatura, las placas son cubiertas con lonas durante un tiempo de 12 a 16 horas.

Una vez el concreto alcanza la resistencia inicial mínima especificada, la cual es de 30MPa, las placas son cortadas de acuerdo con la longitud requerida para cada proyecto.

El proceso para las losas prefabricadas macizas es similar a la losa alveolar, salvo que no es necesario el uso de máquina moldeadora; el vaciado del concreto se hace directamente a los elementos. La longitud de cada elemento se logra ajustando el molde para cada fin.

4.2.4.2 Transporte y montaje

El transporte de los elementos se realiza desde la planta de producción hasta el lugar del proyecto en cama alta de capacidad y dimensiones normales (capacidad 34Tn, ancho 2.50m y longitud 12.0m), llevando en ellos cuantas losas se permitan según el peso de cada una y la capacidad de carga del camión.

Figura 27. Proceso de cargue de losa sobre camión.



Fuente. ANDECE (Asociación Nacional de la Industria del Prefabricado de Hormigón)

Una vez en la obra, las losas se montan con grúas telescópicas sobre las vigas portantes prefabricadas diseñadas para tal fin; como se trata de elementos autoportantes, las losas no requieren de ningún tipo de apuntalamiento, permitiendo superficies de trabajo libres para la ejecución del resto de actividades del proyecto.

Figura 28. Montaje Losa Alveolar



Fuente. ANDECE (Asociación Nacional de la Industria del Prefabricado de Hormigón)

Luego de que las losas estén debidamente posicionadas sobre las vigas portantes, se vierte el concreto de la capa de compresión o *topping* y de las vigas de rigidez en el sentido perpendicular de las vigas portantes. De esta manera se logra el diafragma de entrepiso que transfiere las cargas gravitacionales al resto de la estructura.

4.3 CASO B - LOSA DE ENTREPISO IN SITU

A mayores cargas y luces, las losas macizas resultan de grandes espesores y una buena parte de concreto de la sección transversal queda sin utilizar y por ello las losas aligeradas o nervadas resultan como alternativa.

Las losas nervadas, son de uso generalizado dentro del mercado colombiano. Estas consisten en una combinación monolítica de viguetas regularmente espaciadas, y una loseta colocada en la parte superior, ubicando el refuerzo a tracción en los nervios y remplazando el área de concreto que no se considera útil, por elementos de aligeramiento removibles o fijos como casetón de guadua, poliestireno expandido, bloques de arcilla, entre otros.

4.3.1 Definición del sistema de entrepiso in situ

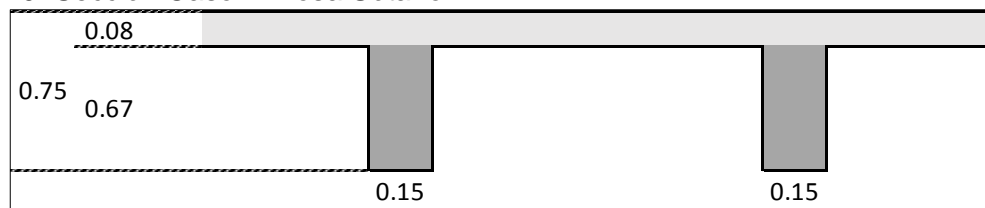
Los nervios principales y los nervios transversales o riostras, de losas nervadas en una dirección, no pueden tenerse en cuenta para efectos de rigidez ante fuerzas horizontales del sistema de resistencia sísmica. Por lo anterior, en el análisis de la losa nervada solo se tendrán en cuenta los efectos de las cargas gravitacionales estáticas.

Dicho esto, el sistema estructural de resistencia sísmica será análogo al Caso A, con una estructura de pórticos (vigas – columnas prefabricados) que resistirán las cargas gravitacionales y muros fundidos in situ que aportarán la resistencia sísmica al edificio.

El vaciado monolítico de viguetas y loseta superior, se considera suficiente para transmitir los efectos del sistema de piso al resto de la estructura, conformándose así, el diafragma de piso requerido por el Reglamento Sismoresistente.

El predimensionamiento geométrico se elaboró teniendo en cuenta el capítulo C.8.13 del reglamento NSR-10.

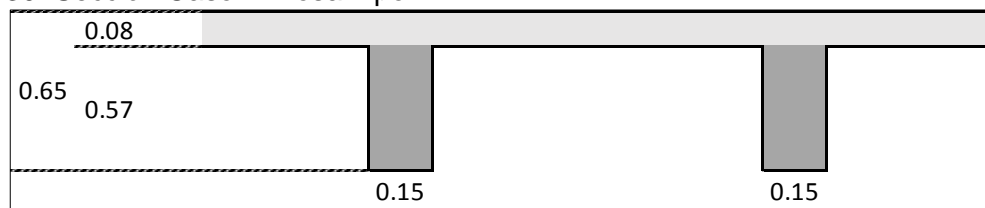
Figura 29: Sección Caso B. Losa Sótano.



Fuente. El Autor

La altura de la losa, corresponderá a la luz entre apoyos de las viguetas, teniendo 75cm para el entrepiso de sótano y 65cm para el entrepiso tipo. En todos los casos el espesor de los nervios será de 0.15m, la separación entre centros de viguetas será de máximo 1.05m y la altura de la loseta será de 0.08m.

Figura 30: Sección Caso B. Losa Tipo



Fuente. El Autor

El esquema de cálculo corresponde al de vigas con uno o ambos extremos continuos. El diseño del refuerzo, se realiza de acuerdo a los procedimientos de diseño del capítulo C.13.5 del Reglamento NSR-10. En el anexo B, se indican los detalles de los cálculos realizados.

4.3.2 Cargas

Las cargas consideradas para el análisis de este Caso son:

- Carga permanente adicional al peso de la estructura de 280 kg/m² para oficinas con particiones móviles y de 280 kg/m² para cubierta.
- Carga de uso de 200 kg/m² para oficinas.
- Carga de uso de techo de 100 kg/m².

4.3.3 Materiales

Se considerará una resistencia a la compresión f'_c a los 28 días de 35MPa, contemplando tener una estructura durable y resistente ante todas las solicitaciones a las que se vea expuesta tanto en la etapa de construcción como de uso.

Tabla 4: Materiales en Caso A.

MATERIALES EN CASO A	
Concreto Viguetas y loseta	35MPa
Acero de refuerzo	420MPa

Fuente. El Autor

4.3.4 Proceso constructivo

- Sobre una estructura provisional generalmente metálica, conformada por parales y cerchas, se coloca un tablero de madera, también llamados camillas, de medidas estándar 1.40m x 0.70m, con el objetivo de conformar la superficie de trabajo de los obreros. Esta superficie también es utilizada como formaleta de fondo para las viguetas de la losa

Figura 31. Estructura de superficie de trabajo.



Fuente. AN-FO (Andamios y formaletas)

- Siguiendo la información de los planos estructurales y una vez replanteados sobre la superficie los elementos de la losa, se elabora el armado de acero de todas las viguetas del entrepiso.

- Se deben colocar los casetones de aligeramiento que además, servirán de formaleta para las viguetas del entrepiso. Según el tipo de casetón utilizado para cada proyecto, estos pueden ser reutilizados según la calidad de éstos y el cuidado que se le dé en la obra.

Figura 32. Armado de acero, instalación y retiro de casetón de aligeramiento.



Fuente. Kangupor

- Una vez revisada la armadura de acero y las dimensiones y posicionamiento de casetones y viguetas, se inicia con el vaciado del concreto de viguetas, teniendo especial cuidado y atención con el vibrado de éste, pues se deben asegurar que se mantengan los recubrimientos estipulados en los diseños.

Figura 33. Vaciado losa aligerada.



Fuente. Ing. Juan José Gómez (Blog DRO 390)

- Con el concreto de viguetas vaciado, se coloca el refuerzo de la loseta superior, que generalmente es una malla de electrosoldada, para finalmente realizar la fundida de concreto correspondiente a esta losa. Una vez alcanzado el nivel de la losa se enrasa y se le da el acabado final –si existiera– a la losa.

Figura 34. Acabado final de losa.



Fuente. CHE (Cuerpos Huecos Estructurales)

- El curado del entrepiso se realiza contantemente dentro de los 7 días siguientes al vaciado con agua o agentes químicos del mercado diseñados para tal fin, buscando conseguir la resistencia de diseño y evitando fisuras por retracción del fraguado.

Figura 35. Curado losa de entrepiso.



Fuente. CHE (Cuerpos Huecos Estructurales)

- Este proceso se repetirá tantas veces como niveles tenga la edificación, teniendo especial cuidado que la estructura de apuntalamiento (puntales y cerchas) no deben retirarse hasta que la losa haya alcanzado su resistencia f'_c de diseño (28 días). Lo anterior evidencia que actividades diferentes a la ejecución de la estructura como instalaciones técnicas, mampostería o acabados en general, no pueden iniciarse hasta que haya sido liberada la estructura de apuntalamiento del entrepiso.

Figura 36. Sistema de apuntalamiento de losa de entrepiso tradicional



Fuente. ULMA

4.4 RESULTADOS

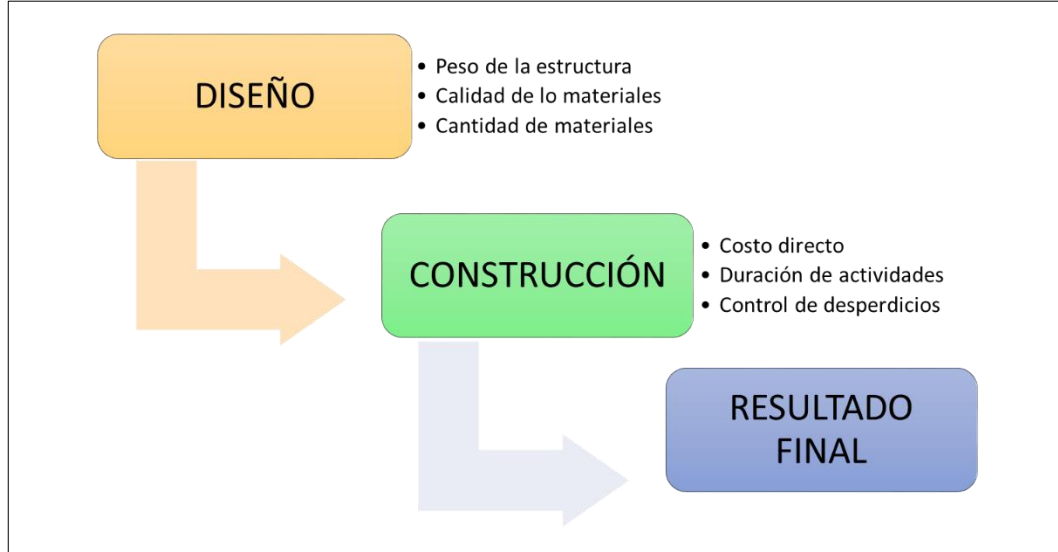
Hasta el momento, se han mencionado las generalidades que se refieren a procedimientos de diseño y construcción, tanto para sistemas constructivos tradicionales como para sistemas prefabricados y, se ha hecho un análisis específico basado en un proyecto real, para el caso de las losas de entrepiso construidas con elementos prefabricados y para losas construidas por métodos tradicionales.

Dicho lo anterior y con base en el concepto de cadena de valor, es necesario examinar ciertos parámetros dentro de los procesos de diseño y construcción de losas de entrepiso y que están presentes y comunes en ambos casos estudiados, que sirven de apoyo para la toma de decisiones en el momento de elegir entre un sistema constructivo u otro.

Se delimitan dos etapas generales, como son el diseño y la construcción, y partir de éstas, se indican a continuación, los parámetros de análisis que permitirán concluir si un caso u otro, presenta resultados positivos o negativos en un proyecto de edificación.

1. Peso de la estructura
2. Calidad de los materiales
3. Cantidad de materiales
4. Costo directo
5. Duración de actividades
6. Control de desperdicios

Figura 37. Diagrama de flujo parámetros de análisis.



Fuente. El Autor

4.4.1 Peso de la estructura

Se tuvo únicamente en cuenta el peso propio de cada uno de los elementos de losa para cada caso, losa alveolar, loseta prefabricada y capa de compresión para el Caso A y, viguetas y loseta superior para el Caso B.

Tabla 5: Resumen Peso Losa Caso A

Elemento	Sotano 1	Piso 1	Piso 2	Piso 3	Total
Losa alveolar	898 Tn				898 Tn
Loseta maciza		337 Tn	337 Tn	337 Tn	1,012 Tn
Capa de compresión	551 Tn	211 Tn	211 Tn	337 Tn	1,309 Tn
Total	1,449 Tn	548 Tn	548 Tn	674 Tn	3,219 Tn
Área	3,277 m ²	1,756 m ²	1,756 m ²	1,756 m ²	8,547 m²
Peso / m²	0.44 Tn/m ²	0.31 Tn/m ²	0.31 Tn/m ²	0.38 Tn/m ²	0.38 Tn/m²

Fuente. El Autor

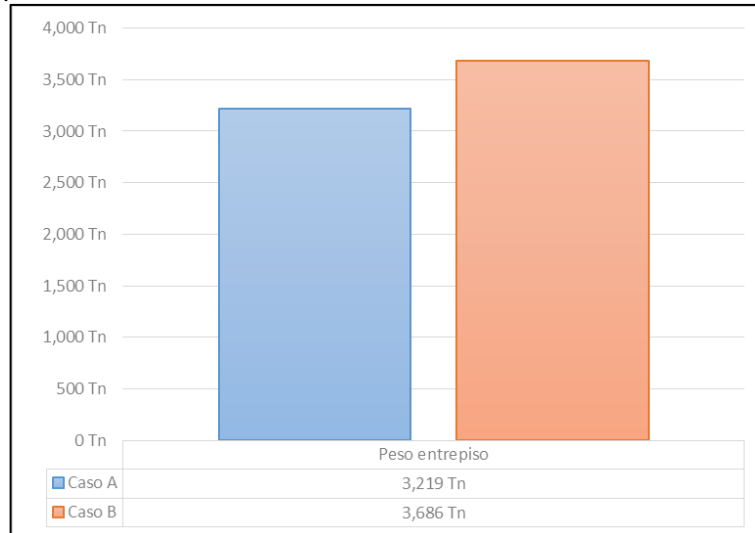
Tabla 6: Resumen Peso Losa Caso B

Elemento	Sotano 1	Piso 1	Piso 2	Piso 3	Total
Loseta	629 Tn	337 Tn	337 Tn	337 Tn	1,641 Tn
Viguetas	855 Tn	397 Tn	397 Tn	397 Tn	2,045 Tn
Total	1,484 Tn	734 Tn	734 Tn	734 Tn	3,686 Tn
Área	3,277 m ²	1,756 m ²	1,756 m ²	1,756 m ²	8,547 m²
Peso / m²	0.45 Tn/m ²	0.42 Tn/m ²	0.42 Tn/m ²	0.42 Tn/m ²	0.43 Tn/m²

Fuente. El Autor

La influencia del peso de entrepiso por metro cuadrado de la estructura de losa para el caso A es de 0.38Tn/m² mientras que para el Caso B es de 0.43 Tn/m²

Figura 38: Comparación del Peso entre Casos.



Fuente. El Autor.

Tabla 7: Diferencia de Peso entre cada Caso

Item	Caso A	Caso B	Diferencia	%
Peso entrepiso	3,219 Tn	3,686 Tn	467 Tn	15%

Fuente. El Autor

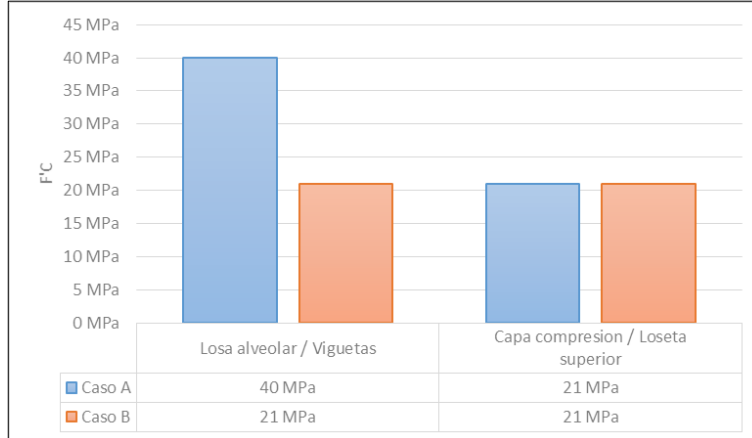
De acuerdo a lo anterior, se evidencia que la estructura de entrepiso del Caso B representa un 15% de mayor peso frente al Caso A.

4.4.2 Calidad de los materiales

Como se ha mencionado en capítulos anteriores, en la planta, la fabricación de elementos prefabricados se realiza bajo estrictos controles de calidad. Las fábricas de prefabricados tienen la posibilidad de elaborar sus propios concretos, incluyendo este proceso dentro de su plan de calidad permitiendo además, alcanzar resistencias a la compresión mayores a las de un concreto elaborado en obra e incluso, a las que se consiguen el mercado

Se presentan a continuación las consideraciones de resistencia a la compresión del concreto para cada Caso.

Figura 39: Comparación de f_c entre Casos.



Fuente. El Autor.

Tabla 8: Diferencia de f_c en cada Caso.

Caso	Losa alveolar / Viguetas	Capa compresion / Loseta superior
Caso A	40 MPa	21 MPa
Caso B	21 MPa	21 MPa
Diferencia	-19 MPa	0 MPa
%	-48%	0%

Fuente. El Autor

La resistencia a la compresión de los elementos estructurales, viguetas para el Caso B es 48% menor frente a la losa alveolar y loseta prefabricada para el Caso A.

La capa de compresión in situ del Caso A, requerida para lograr la transferencia de fuerzas horizontales por la acción del diafragma, se diseña con una f_c a los 28 de 21MPa, teniendo en cuenta que es un concreto que se elaborará en obra o se comprará a un proveedor; lo anterior, no representa ninguna diferencia frente a la f_c de diseño de la loseta o torta superior del Caso B.

4.4.3 Cantidad de concreto

Una consecuencia del uso de concretos de alto desempeño (f_c entre 40MPa y 100MPa) es la optimización de las secciones de los elementos estructurales, lo cual, se traduce en disminución de la cantidad de concreto.

El análisis de cantidad de volumen de concreto se hizo para resultados teóricos y no se tuvieron en cuenta porcentajes de desperdicio o factores de pérdida de material.

Tabla 9: Resumen Volumen Losa prefabricada Caso A

Item	Área en planta	Seccion transversal	Losa prefabricada
Sótano	3,277 m ²	0.11 m ³ /m ²	374 m ³
Piso 1	1,756 m ²	0.08 m ³ /m ²	141 m ³
Piso 2	1,756 m ²	0.08 m ³ /m ²	141 m ³
Piso 3	1,756 m ²	0.08 m ³ /m ²	141 m ³
Volumen Total			796 m ³
Area total entrepiso			8,547 m ²
Volumen / m ²			0.09 m ³ /m ²

Fuente. El Autor

Tabla 10: Resumen Volumen Capa de compresión Caso A

Item	Área en planta	Seccion transversal	Capa de compresion
Sótano	3,277 m ²	0.07 m ³ /m ²	229 m ³
Piso 1	1,756 m ²	0.05 m ³ /m ²	88 m ³
Piso 2	1,756 m ²	0.05 m ³ /m ²	88 m ³
Piso 3	1,756 m ²	0.08 m ³ /m ²	141 m ³
Volumen Total			546 m ³
Area total entrepiso			8,547 m ²
Volumen / m ²			0.06 m ³ /m ²

Fuente. El Autor

El volumen total de concreto requerido para en el Caso A, resultante de la suma del componente prefabricado y la capa de compresión (*topping*) es de 1,341m³.

Tabla 11: Resumen Volumen Viguetas Caso B

Item	Área en planta	Seccion transversal	Viguetas
Sótano	475 m ²	0.75 m ³ /m ²	356 m ³
Piso 1	254 m ²	0.65 m ³ /m ²	165 m ³
Piso 2	254 m ²	0.65 m ³ /m ²	165 m ³
Piso 3	254 m ²	0.65 m ³ /m ²	165 m ³
Volumen Total			852 m ³
Area total entrepiso			8,547 m ²
Volumen / m ²			0.10 m ³ /m ²

Fuente. El Autor

Tabla 12: Resumen Volumen Loseta Superior Caso B

Item	Área en planta	Seccion transversal	Loseta superior
Sótano	3,277 m ²	0.08 m ³ /m ²	262 m ³
Piso 1	1,756 m ²	0.08 m ³ /m ²	141 m ³
Piso 2	1,756 m ²	0.08 m ³ /m ²	141 m ³
Piso 3	1,756 m ²	0.08 m ³ /m ²	141 m ³
Volumen Total			684 m ³
Area total entrepiso			8,547 m ²
Volumen / m ²			0.08 m ³ /m ²

Fuente. El Autor

El volumen total de concreto requerido para en el Caso B, resultante de la suma de las viguetas más la loseta superior es de 1,536m³.

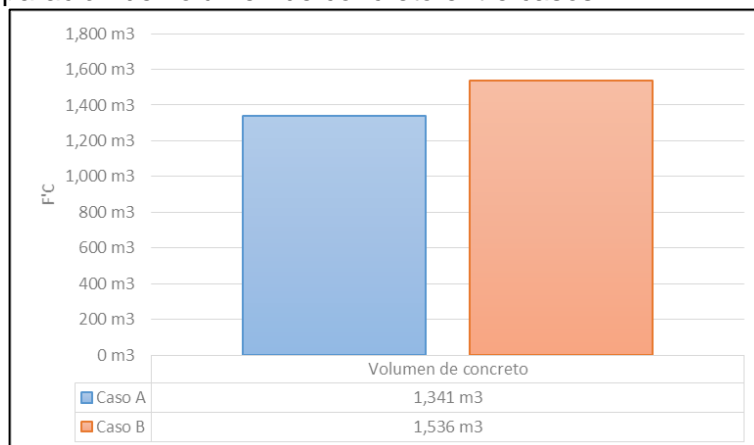
Tabla 13: Diferencia de volumen de concreto en cada caso

Caso	Volumen de concreto
Caso A	1,341 m ³
Caso B	1,536 m ³
Diferencia	195 m ³
%	15%

Fuente. El Autor

La cantidad de concreto requerida para el Caso B es un 15% mayor que la requerida en el Caso A. Dicho de otro modo, la influencia del concreto por superficie de entrepiso es de 0.15m³/m² en el Caso A, mientras que en el Caso B es de 0.18m³/m².

Figura 40: Comparación de volumen de concreto entre casos.



Fuente. El Autor.

4.4.4 Costo directo

El factor económico es sin duda determinante al momento de definir entre sistemas constructivos; el costo directo junto al programa de obra, son la base de la evaluación financiera y del análisis de inversión para cualquier proyecto.

Para el desarrollo del presente apartado, se investigaron los costos de materias primas y rendimientos de mano de obra y equipos en el mercado de la ciudad de Bogotá y, a partir de éste, se elaboró el análisis de precios unitarios (APU).

Para ambos casos, se tuvieron en cuenta y se evaluaron de manera detalla, los recursos necesarios y su influencia unitaria en la ejecución de un metro cuadrado (m²) de losa.

Una vez obtenido el valor por metro cuadrado para cada Caso, se obtendrá el valor total de la estructura a partir de la simple multiplicación de éste por el área total de entrepiso para la edificación que es de 8,547m².

A continuación se presenta el análisis de precios unitarios (APU) para el Caso A, teniendo en cuenta que para éste se tienen dos tipo de elementos prefabricados; losa alveolar para el entrepiso del cielo de sótano y losa maciza para el piso tipo.

Tabla 14. Análisis de precios unitarios para Caso A - Losa Alveolar

Descripción actividad. Suministro y colocación de losas alveolares prefabricadas de concreto pretensado, de 20 cm de canto y de 100 a 120 cm de anchura, para formación de losa de canto 20 + 7 cm, apoyada directamente sobre vigas portantes (no incluidos en este precio); capa de compresión con concreto f'c=210 kg/cm ² (21 MPa), tamaño máximo del agregado 12,5 mm, manejabilidad blanda, fabricado en planta y fundido con balde de pluma grúa; acero Grado 60 y malla electrosoldada tipo XX 159. Montaje mediante grúa telescópica.					
Insumo	Unidad	Cantidad	% perdida	Vr Unitario	Vr Total
Materiales					
Placa alveolar prefabricada incluye transporte a obra	m2	1.00	1.00	\$ 69,544	\$ 69,544
Malla electrosoldada	kg	2.83	1.15	\$ 2,583	\$ 8,406
Concreto premezclado f'c 3000psi	m3	0.07	1.05	\$ 365,000	\$ 26,828
Sub-total					\$ 104,777
Mano de obra					
Hora cuadrilla montador	hr	0.53	1.00	\$ 22,443	\$ 11,962
Hora cuadrilla armado acero	hr	0.25	1.00	\$ 27,240	\$ 6,810
Hora cuadrilla encofrado y vaciado	hr	1.42	1.00	\$ 40,603	\$ 57,656
Sub-total					\$ 76,428
Equipo y herramienta menor					
Grúa montaje 30Tn	hr	0.27	1.00	\$ 175,000	\$ 46,638
Tabla chapa 30x2 - 3m - Ord	un	1.00	1.00	\$ 22,906	\$ 22,906
Herramienta menor	%	2%	1.00	\$ 181,206	\$ 3,624
Sub-total					\$ 73,168
Transporte					
--	vj	0.00	1.00	\$ 0	\$ 0
Sub-total					\$ 0
Total					\$ 254,373

Fuente. El Autor

Tabla 15. Análisis de precios unitarios para Caso A - Losa Maciza

Descripción actividad. Suministro y colocación de losas maciza prefabricadas de concreto reforzado de 8 cm de canto y de 120cm de anchura, para formación de losa de canto 8 + 5cm, apoyada directamente sobre vigas portantes (no incluidos en este precio); capa de compresión con concreto f'c=210 kg/cm ² (21 MPa), tamaño máximo del agregado 12,5 mm, manejabilidad blanda, fabricado en planta y fundido con balde de pluma grúa; acero Grado 60 y malla electrosoldada tipo XX 159, 25x25 cm y Ø 4-4 mm. Montaje mediante grúa telescópica.					
Insumo	Unidad	Cantidad	% pérdida	Vr Unitario	Vr Total
Materiales					
Placa maciza prefabricada	m2	1.00	1.00	\$ 36,548	\$ 36,548
Malla electrosoldada	kg	2.83	1.15	\$ 2,583	\$ 8,406
Concreto premezclado f'c 3000psi	m3	0.05	1.05	\$ 365,000	\$ 19,163
Sub-total					\$ 64,117
Mano de obra					
Hora cuadrilla montador	hr	0.53	1.00	\$ 22,443	\$ 11,962
Hora cuadrilla armado acero	hr	0.25	1.00	\$ 27,240	\$ 6,810
Hora cuadrilla encofrado y vaciado	hr	1.42	1.00	\$ 40,603	\$ 57,656
Sub-total					\$ 76,428
Equipo y herramienta menor					
Grúa montaje 30Tn	hr	0.27	1.00	\$ 175,000	\$ 46,638
Tabla chapa 30x2 - 3m - Ord	un	1.00	1.00	\$ 22,906	\$ 22,906
Herramienta menor	%	2%	1.00	\$ 140,546	\$ 2,811
Sub-total					\$ 72,354
Transporte					
--	vj	0.00	1.00	\$ 0	\$ 0
Sub-total					\$ 0
Total					\$ 212,900

Fuente. El Autor

Según lo anterior y para un área total de 8,547m² el costo directo del Caso A será de \$1,955 millones COP.

Tabla 16. Costo directo total Caso A

Item	Área en planta	Valor / m2	Valo Total
Sótano	3,277 m2	\$254,373	\$833,623,189
Piso 1	1,756 m2	\$212,900	\$373,947,967
Piso 2	1,756 m2	\$212,900	\$373,947,967
Piso 3	1,756 m2	\$212,900	\$373,947,967
Total			\$1,955,467,088

Fuente. El Autor

Dentro del el análisis de precios unitarios del Caso B, se tendrán en cuenta tanto viguetas como loseta superior.

Tabla 17. Análisis de precios unitarios para Caso B.

Descripción actividad. Losa aligerada de concreto armado con casetón recuperable, realizado con concreto f'c=210 kg/cm² (21 MPa), tamaño máximo del agregado 12,5 mm, manejabilidad blanda, fabricado en planta; acero Grado 60 (fy=4200 kg/cm²); nervios de concreto "in situ" de 15 cm de espesor, capa de compresión de 8cm de espesor, con armadura de reparto formada por malla electrosoldada tipo XX 159.					
Insumo	Unidad	Cantidad	% perdida	Vr Unitario	Vr Total
Materiales					
Acero corrugado fig. 1/4" a 1" - 60.000psi	kg	2.40	1.02	\$ 2,202	\$ 5,387
Alambre negro recocido	kg	0.06	1.02	\$ 3,032	\$ 185
Malla electrosoldada	kg	2.83	1.05	\$ 2,583	\$ 7,675
Caseton icopor reutilizable	m3	0.52	1.00	\$ 72,430	\$ 37,722
Concreto premezclado f'c 3000psi - Grava comun	m3	0.18	1.05	\$ 365,000	\$ 68,874
Desmoldante	kg	0.32	1.10	\$ 17,106	\$ 6,021
Sub-total					\$ 125,865
Mano de obra					
Hora cuadrilla encofrado y vaciado	hr	0.45	1.00	\$ 22,713	\$ 10,221
Oficial obra negra	hr	0.20	1.00	\$ 13,633	\$ 2,727
Ayudante obra negra	hr	0.20	1.00	\$ 9,080	\$ 1,816
Hora cuadrilla armado acero	hr	0.05	1.00	\$ 16,332	\$ 817
Sub-total					\$ 15,580
Equipo y herramienta menor					
Sistema de encofrado - Incluye puntales, cerchas y superficie de madera	m2	1.00	1.00	\$ 39,400	\$ 39,400
Herramienta menor	%	2%	1.00	\$ 141,446	\$ 2,829
Sub-total					\$ 42,229
Total					\$ 183,675

Fuente. El Autor

El valor por m2 de losa en el Caso B es de \$183,675, para el área total de 8,547m² el costo directo total será de \$1,570 millones COP.

El índice de costo por m2 resulta de la relación del valor total de la estructura de entre el área total de la edificación

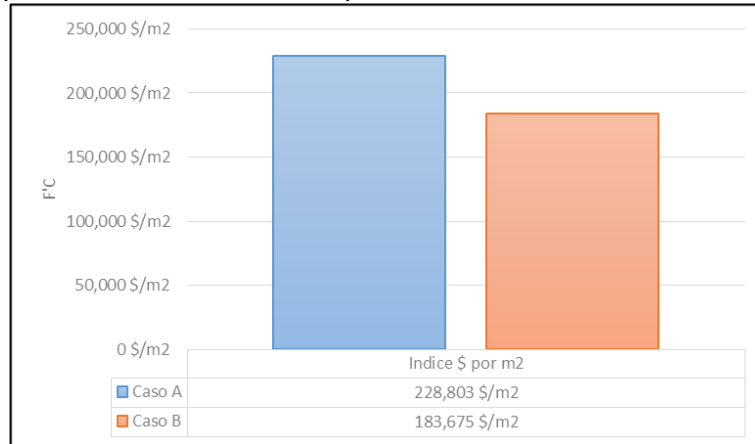
Tabla 18. Diferencia del costo por m2 entre casos.

Caso	Area	Costo Total	Indice \$ por m2
Caso A	8,547 m2	\$1,955,467,088	228,803 \$/m2
Caso B	8,547 m2	\$1,569,778,754	183,675 \$/m2
Diferencia			-45,128 \$/m2
			-20%

Fuente. El Autor

El índice de costo por m2 del Caso B es de un 20% menos frente al Caso A.

Figura 41. Comparación del costo directo por m2



Fuente. El Autor

4.4.5 Programa de Obra

El componente tiempo es una de las consideraciones más importantes dentro de un proyecto de construcción; la fecha final de entrega afecta los costos indirectos, pues una mayor duración de la obra aumenta los gastos generales y los gastos administrativos, por otro lado, posponer la puesta en servicio de una edificación puede implicar gastos adicionales o pérdidas económicas para inversionistas.

Ejecutar una obra dentro del plazo pactado, resulta luego del cumplimiento de una serie de actividades o hitos basados en rendimientos teóricos, según la información de fabricantes y la experiencia general de quien elabora el programa.

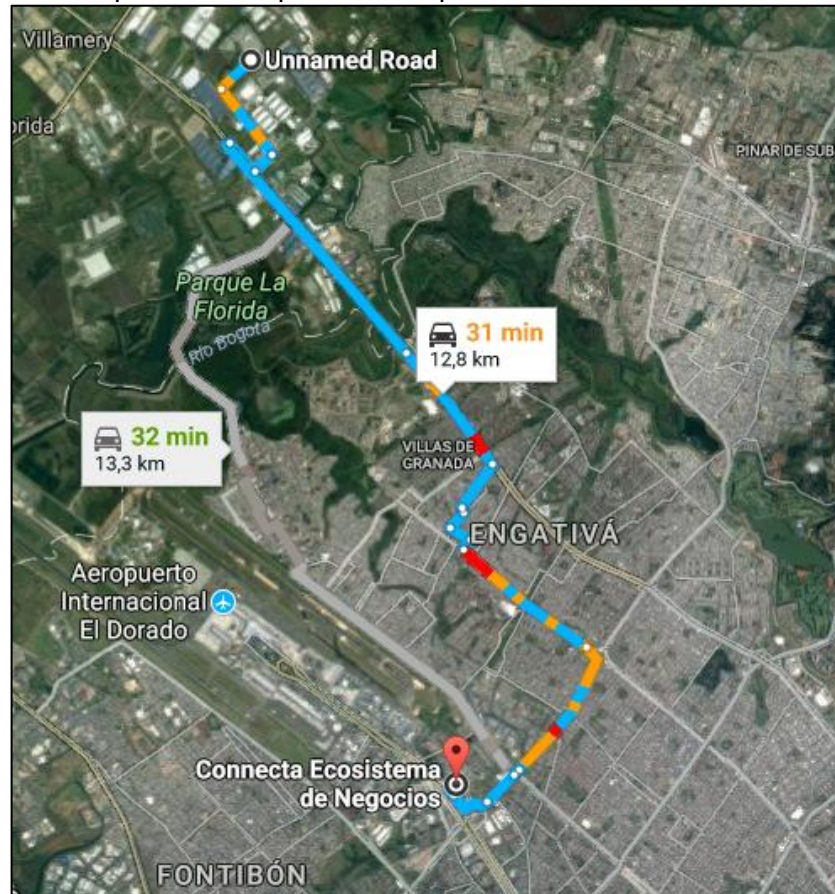
Los programas de obra se pueden diferenciar en programas de fabricación, transporte y montaje para el Caso A y programas de construcción para el Caso B.

Para el desarrollo de este componente, se acudió a fabricantes de prefabricados y a constructores con presencia en el mercado local. Se limitará para ambos casos, al análisis de los elementos de entepiso. Demás actividades, como actividades preliminares, columnas, vigas, acabados, etc., no se tendrán en cuenta.

La fabricación de elementos prefabricados, corresponde a disponibilidad de pistas, moldes, ritmo de producción y requerimientos de fabricación de la empresa o planta de prefabricados. Así mismo, como se trata de una actividad que no se ejecuta dentro del proyecto, la responsabilidad de la obra se limita únicamente a la suficiente antelación de pedido o de orden de compra. Dicho lo anterior, no resulta comparable incluir la fabricación de las losas prefabricadas dentro del presente estudio.

El transporte se ejecuta desde la planta de fabricación hasta el sitio de obra. Para este caso, se considera que la fábrica está ubicada en el municipio de Cota, Cundinamarca.

Figura 42. Recorrido para el transporte de los prefabricados.



Fuente. Google Maps

Se asume que la estructura de vigas portantes sobre las que se instalarán las losas se encuentra terminada y lista para el montaje de los prefabricados. Se consideran 8 horas de trabajo diario y de acuerdo a las investigaciones con empresas prefabricadoras el rendimiento de instalación es de aproximadamente 12 losas al día. La anterior consideración es válida, siempre y cuando se trate de losas de las mismas dimensiones.

Como se observa en la configuración en planta, para el Caso A, en general se tienen losas con idénticas dimensiones. Para el ejercicio de la duración de montaje en el presente caso, se consideran losas de medidas de 1.20m de ancho por 7.50m de longitud.

Tabla 19. Duración actividades Caso A

Item	Horas trabajo diario	Rendimiento diario (un)	Rendimiento horario (un)	Rendimiento diario (m2)	Área	Duración total (días hábiles)
Montaje losa alveolar	8 Hr/día	15 un	0.53 un/hr	135 m2/día	3,277 m2	24 días
Montaje losa maciza	8 Hr/día	15 un	0.53 un/hr	135 m2/día	5,269 m2	39 días
Total						63 días
Area total						8,547 m2
Indice area instalada por día						135 m2/día

Fuente. El Autor

De acuerdo a lo anterior, la duración del montaje de los elementos prefabricados será de 63 días hábiles.

Teniendo en cuenta que los elementos prefabricados son pretensados, estos luego de ser ejecutados generan una contraflecha en su longitud, razón por la cual el vaciado de la capa de compresión debe hacer inmediatamente se han instalado las losas prefabricadas, contemplándose este tiempo, dentro de la duración de actividades del Caso A mencionada en el párrafo anterior.

Con el Caso B, luego de investigar el mercado local, se obtiene que el rendimiento de construcción de entrepiso con losa aligerada es de aproximadamente 500m2 por semana, incluyendo el tiempo entre el vaciado de una losa y el encofrado de la losa del siguiente nivel. La anterior consideración aplica para entrepiso con una configuración en planta regular como es la que tenemos para el Caso B.

Considerando 6 días de trabajo a la semana, a continuación se presenta el análisis de duración de actividades para la losa de entrepiso tradicional.

Tabla 20. Duración actividades Caso B

Item	Horas trabajo diario	Rendimiento semana (m2)	Días trabajo semanal	Rendimiento diario (m2)	Área	Duración total (días hábiles)
Losa Sótano 1	8 Hr/día	500 m2/sem	6 días/sem	83 m2/día	3,277 m2	39 días
Losa Tipo	8 Hr/día	500 m2/sem	6 días/sem	83 m2/día	5,269 m2	63 días
Total						103 días
Area total						8,547 m2
Indice area instalada por día						83 m2/día

Fuente. El Autor

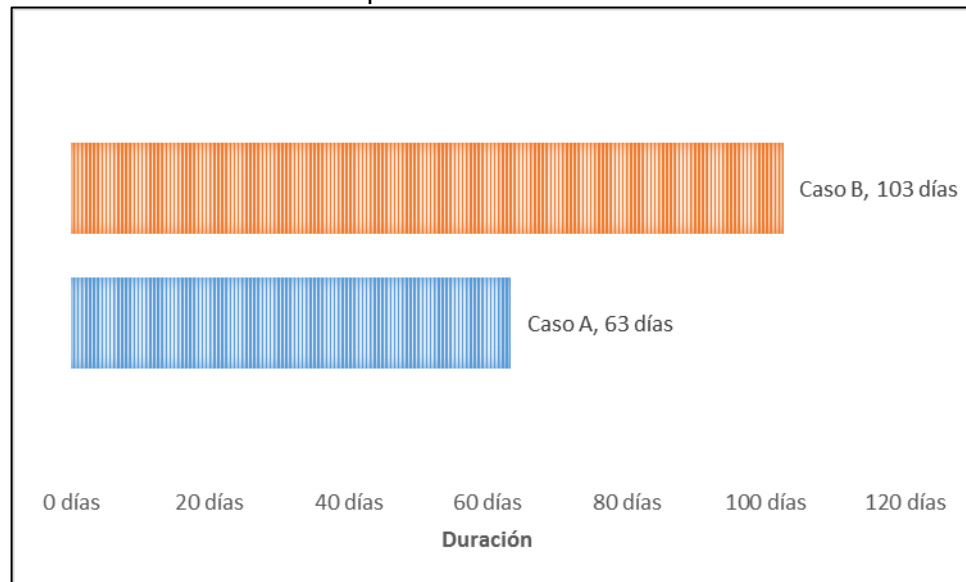
Tabla 21. Comparación duración actividades

Caso	Area	Duración
Caso A	8,547 m2	63 días
Caso B	8,547 m2	103 días
Diferencia		39 días
%		62%

Fuente. El Autor

La finalización de entrepiso en el Caso B tarda 103 días, lo cual significa un 62% más que lo que demoraría la ejecución del entrepiso usando elementos prefabricados.

Figura 43: Duración de actividades para cada Caso.



Fuente. El Autor

La anterior comparación, se realizó basado en la suposición que, para ambos casos se tienen condiciones climáticas óptimas (tiempo seco) y, aunque si bien es cierto este factor no afecta la ejecución de actividades para el Caso A, es importante aclararlo para tener resultados comparables.

4.3.6 Control de desperdicios

Según datos del Green Building Council, las edificaciones emplean el 40% de los recursos no renovables, (3 billones de toneladas al año) para construcciones alrededor del planeta⁴⁹.

Es ampliamente conocido, que los componentes principales del concreto provienen de fuentes con recursos no renovables; con la explotación de canteras y el uso del agua se hace necesario tener procedimientos estrictos y responsables desde la elaboración hasta el vaciado del concreto y, de esta manera, aportar al logro de construcciones ambientalmente responsables.

⁴⁹ U.S. GREEN BUILDING COUNCIL (USGBC). An Introduction to the U.S. Green Building Council and the LEED Green Building Rating System. Washington, DC : s.n., 2005.

El desperdicio de material se define como el factor de pérdida, mayor que la unidad que representa una mayor cantidad de concreto usado por razones del proceso constructivo, medios de vaciado, formaletas y moldes y experticia del personal operativo.

Durante la presente investigación, no fue posible el acceso específico a datos estadísticos sobre los desperdicios de concreto que se tienen tanto en empresas prefabricadoras como en constructores del mercado global. Sin embargo, para el ejercicio de la presente comparación, en ambos casos, los respectivos profesionales encargados tanto de procesos prefabricados como de procesos tradicionales, suministraron la información con la que han trabajado.

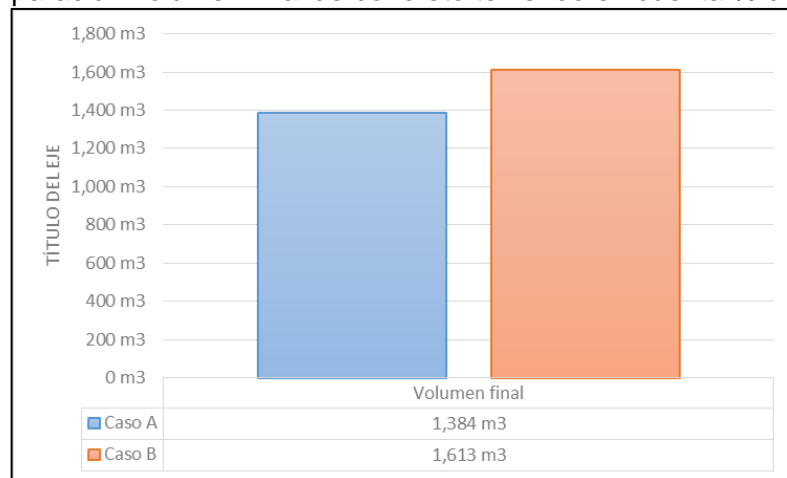
A continuación se presenta el resumen de esta información.

Tabla 22. Diferencia en porcentaje de desperdicio de material.

Caso	Volumen de concreto	Porcentaje desperdicio	Volumen Real	Volumen final
Caso A - Prefabricados	796 m3	2%	812 m3	1,384 m3
Caso A - Topping	546 m3	5%	573 m3	
Caso B - Viguetas	852 m3	5%	895 m3	1,613 m3
Caso B - Loseta superior	684 m3	5%	718 m3	
Diferencia				228 m3
				% 16%

Fuente. El Autor

Figura 44. Comparación volumen final de concreto teniendo en cuenta % de desperdicio



Fuente. El Autor

El porcentaje de desperdicio de concreto que se establece para elementos prefabricados es del 2%, para el resto de elementos capa de compresión (Caso A) y viguetas y loseta superior (Caso B), es desperdicio de material es del 5%. Lo anterior representa una diferencia del 16% de mayor volumen final en el Caso B frente al Caso A.

5. INDICADORES CUANTITATIVOS

En el ámbito de las investigaciones universitarias es frecuente el uso de indicadores, como herramienta de apoyo al autor o al evaluador de una investigación; un indicador cuantitativo permite establecer diferencias entre dos o más elementos que se pretenden comparar⁵⁰.

En este sentido, a partir de los resultados obtenidos en el capítulo 4 del presente documento, a continuación se describirá y se generarán para cada parámetro definido en el mencionado capítulo, indicadores cuantitativos con el objetivo de generar herramientas que faciliten la toma de decisiones.

5.1 Indicador Peso de la Estructura – I_{PE}

Ante la ocurrencia de un sismo, entre más liviana sea una estructura, menor será la fuerza que tendrá soportar, además, una masa muy grande, se mueve con mayor brusquedad y por lo tanto transmitirá mayor exigencia a sus elementos estructurales, por otro lado, entre menor sea el peso de la estructura, menores serán las cargas gravitacionales transmitidas a la cimentación, lo cual implica un menor costo de ésta.

Dicho lo anterior, a partir de la relación $\frac{\text{Peso Caso A}}{\text{Peso Caso B}}$, se establecerá que si el resultado de este cociente es menor que la unidad, se considera para el caso de estudio, que el uso de elementos prefabricados representa una condición favorable para la losa de entrepiso de la edificación. Por otro lado, un resultado mayor que la unidad indicará como favorable la construcción del entrepiso haciendo uso métodos tradicionales, como el de una losa aligerada.

$$I_{PE} = \frac{\text{Peso Caso A}}{\text{Peso Caso B}} = \frac{3,219Tn}{3,686Tn} = 0.87$$

El valor $I_{PE} = 0.87$, indica que para el Caso de Estudio, el uso de componentes prefabricados resulta favorable para la edificación.

5.2 Indicador Calidad de los materiales – I_{CM}

El uso de materiales con especificaciones exigentes, tales como el uso de concreto de alto desempeño, asegura la calidad y la alta resistencia de los elementos estructurales, garantizando así, durabilidad al producto entregado y protegiendo la inversión del usuario final de la edificación.

⁵⁰ LÓPEZ BAENA, Alfonso Juan, Valcárce Cases, Miguel y Barbancho Medina, Manuel. Indicadores Cuantitativos y Cualitativos para la Evaluación de la Actividad Investigadora: ¿Complementarios? ¿Contradictorios? ¿Excluyentes? 2005, p.1

La relación $\frac{f'c \text{ Caso A}}{f'c \text{ Caso B}}$ proporcionará la condición de favorable al Caso A, si dicha relación es mayor que la unidad; resultado contrario sucederá, si el valor es menor que la unidad, pues éste indicará que el Caso B resulta de ventaja dentro de la edificación.

Según la evaluación del apartado 4.4.2, la calidad del concreto de la capa de compresión (Caso A) y de la loseta superior (Caso B) es el mismo, por lo cual no se tendrán en cuenta estos elementos en la evaluación del indicador I_{CM} .

$$I_{CM} = \frac{f'c \text{ Caso A}}{f'c \text{ Caso B}} = \frac{40MPa}{21MPa} = 1.90$$

El valor $I_{CM} = 1.90$, indica que para el Caso de Estudio, el uso de componentes prefabricados resulta favorable para la edificación.

5.3 Indicador Cantidad de Concreto – I_{CC}

Mayor cantidad de material se traduce, en primer lugar, en mayor peso para la estructura, en segundo lugar, puede repercutir en mayor costo de la actividad y, por último, obliga a la administración de mayor cantidad de material (controles de calidad, aseguramiento del recurso en el momento y cantidad requeridas, etc.).

El resultado del cociente $\frac{Q \text{ Caso A}}{Q \text{ Caso B}}$, indicará que si éste es menor que la unidad, representará una condición favorable para el Caso A, e igual condición para el Caso B, si esta relación es mayor que la unidad.

$$I_{CC} = \frac{Q \text{ Caso A}}{Q \text{ Caso B}} = \frac{1,341m^3}{1,536m^3} = 0.87$$

El valor $I_{CC} = 0.87$, indica que para el Caso de Estudio, el uso de componentes prefabricados resulta favorable para la edificación.

5.4 Indicador Costo Directo – I_{APU}

Basado en la importancia del factor económico en la evaluación de proyectos y en el análisis de precios unitarios elaborado para cada Caso, se define que si el indicador I_{APU} es menor que la unidad, representará una condición favorable para el Caso A, o condición positiva para el Caso B, si esta relación es mayor que la unidad.

$$I_{APU} = \frac{\text{Costo directo Caso A}}{\text{Costo directo Caso B}} = \frac{\$ 228,803 m^2}{\$ 183,675 m^2} = 1.25$$

Lo anterior indica que el índice I_{APU} resulta favorable para el uso de sistemas tradicionales (in situ).

5.5 Indicador Programa de obra – I_{PO}

Reducción de los cronogramas de obra significa, sin duda, ahorro de dinero tanto en el costo del proyecto, como en recuperación de dinero por parte del inversionista. Es así, que resulta muy importante definir si el componente tiempo es favorable a una u otra solución.

Dicho esto, para el indicador I_{PO} , resultante de la relación $\frac{Duración\ Caso\ A}{Duración\ Caso\ B}$, será favorable al Caso A si su valor es menor que la unidad y, favorable al Caso B si, su resultado es mayor que la unidad.

$$I_{PO} = \frac{Duración\ Caso\ A}{Duración\ Caso\ B} = \frac{63\ días}{103\ días} = 0.62$$

Así entonces, en el componente tiempo, el uso de elementos prefabricados resulta de ventaja frente al empleo de la construcción tradicional.

5.6 Indicador Sustentabilidad (Control de desperdicios) – I_{CD}

El concepto de sustentabilidad es en algunos casos, ligado a un mayor costo, o por lo menos en lo que se refiere al costo directo de la obra; sin embargo, ante la problemática ambiental que vivimos y que es mundialmente conocida, el Ingeniero debe eliminar de su ejercicio, el uso de prácticas que sigan haciendo uso indiscriminado de los recursos naturales que dispone.

Para el presente documento, el indicador sostenibilidad se basará en el porcentaje de desperdicios de concreto que genere la aplicación de sistemas prefabricados frente a sistemas in situ.

El indicador resultará de la relación $\frac{Q_{final\ Caso\ A}}{Q_{final\ Caso\ B}}$, siendo favorable al Caso A si ésta resulta menor que la unidad y favorable al Caso B si su resultado es mayor que la unidad.

$$I_{CD} = \frac{Q_{final\ Caso\ A}}{Q_{final\ Caso\ B}} = \frac{1,384m^3}{1,613m^3} = 0.85$$

Teniendo en cuenta el Indicador $I_{CD} = 0.85$, usar elementos prefabricados resultará favorable no solo frente a los sistemas tradicionales, sino también, favorable a la construcción de edificaciones ambientalmente responsables.

5.7 Consolidación de indicadores

Ídem al capítulo 3, a partir de los conceptos de cadena de valor de Porter y del Método Delphi, se establecen, en una escala de 0 a 100%, los siguientes parámetros de importancia a los indicadores evaluados con el objetivo de lograr conclusiones más precisas:

Figura 45. Cadena de valor indicadores evaluados

ACTIVIDADES SECUNDARIAS	Indicador de diferencias cualitativas (I_{DC})	10.0%
	Indicador Calidad de los materiales (I_{CM})	10.0%
	Indicador Cantidad de Concreto (I_{CC})	10.0%
	Indicador Sustentabilidad (Control de desperdicios) (I_{CD})	10.0%
ACTIVIDADES PRIMARIAS	Indicador Peso de la Estructura (I_{PE})	20%
	Indicador Costo Directo (I_{APU})	20%
	Indicador Programa de obra (I_{PO})	20%

Fuente. El Autor

Dicho lo anterior, se obtiene la siguiente tabla con la consolidación de los indicadores evaluados.

Tabla 23. Consolidación de indicadores

Indicador	% de importancia	Valor	Condición
I_{PE}	20%	0.87	Favorable Caso A
I_{CM}	10%	1.90	Favorable Caso A
I_{CC}	10%	0.87	Favorable Caso A
I_{APU}	20%	1.25	Favorable Caso B
I_{PO}	20%	0.62	Favorable Caso A
I_{CD}	10%	0.85	Favorable Caso A
I_{DC}	10%	1.07	Favorable Caso A

Fuente. El Autor

Como se observa, de los 7 indicadores analizados y para la escala establecida, el uso de sistemas prefabricados representa el 80% de la escala de importancia y, el 20% restante lo representan los sistemas in situ. De lo anterior, se puede concluir, como positivo el uso de elementos prefabricados frente al uso de sistemas constructivos tradicionales.

CONCLUSIONES

Los sistemas constructivos in situ y prefabricados, presentan aspectos con la misma aplicabilidad en el ámbito de las edificaciones del país; en virtud de lo establecido en la NSR-10, en lo que refiere al diseño, aspectos como estudios geotécnicos, diseños preliminares, evaluación de cargas, procedimientos de diseño y análisis sísmico y diseño de la cimentación, se rigen de la misma manera. Sin embargo, el mencionado reglamento, penaliza el diseño estructural del sistema de resistencia sísmica con elementos prefabricados asignando un coeficiente de disipación de energía $R=1.50$, lo que implica un aumento en los efectos sísmicos E.

El uso de sistemas in situ, permite la fácil adaptación arquitectónica de la edificación a diseños con formas irregulares; por otro lado, dicha adaptación no resulta tan fácil en la construcción prefabricada, pues se requiere que desde el inicio del proyecto exista una integralidad de diseños estructurales y arquitectónicos pensando en la involucración de los prefabricados. Lo anterior podría suponer una desventaja con el uso de prefabricados, que sólo podría comprobarse con la comparación entre varias edificaciones con diferentes configuraciones tanto en planta como en alzado.

Los procesos de construcción son sin duda diferentes entre ambos sistemas; los métodos in situ, a pesar de los avances en tecnología del concreto, siguen siendo artesanales, dando espacio a errores por factores humanos y manteniendo incertidumbre en el cumplimiento de plazos de construcción. Los prefabricados, se ejecutan en fábricas con estrictos parámetros de calidad, con procesos industrializados que finalizan con actividades de transporte y montaje con requerimientos de mano de obra y equipos mínimos.

Los indicadores del caso de estudio que resultaron de la presente investigación, permiten establecer qué sistema resulta de mayor ventaja entre uno u otro; además, proporcionan en términos de orden de magnitud la relación de cada aspecto analizado frente a cada sistema, si se quisieran evaluar por separado.

El resultado de la evaluación de los indicadores cuantitativos de comparación: peso de la estructura (I_{PE}), calidad de los materiales (I_{CM}), cantidad de concreto (I_{CC}), programa de obra (I_{PO}), sustentabilidad (I_{CD}) y el indicador cualitativo (I_{DC}) permiten establecer que el uso de elementos prefabricados es una solución óptima en la construcción de losas de entrepiso. Únicamente la evaluación del indicador de costo (I_{APU}) concluye que el uso de sistemas in situ es favorable frente al uso de prefabricados.

Con los criterios evaluados, se evidencia que el uso de elementos prefabricados en la construcción de losas de entrepiso es ampliamente más favorable que el uso de sistemas de losas aligeradas; si bien es cierto, han sido pocas las investigaciones y estudios de la temática de esta investigación, los resultados en cuanto a mejoramiento de diseños, calidad de las construcciones, cumplimiento de plazos y

aporte a las sustentabilidad obtenidos en el presente documento suponen un panorama positivo a la aplicación en la construcción de elementos prefabricados,

El país cuenta con los medios para ejecutar construcciones prefabricadas, existen empresas en el mercado intentando hacerse un lugar, garantizando tecnología, calidad, presupuestos cerrados y cumplimiento de plazos. Haría falta más divulgación y el ajuste de las normas vigentes, dándole lugar al prefabricado como un elemento tan confiable como los que se utilizan en la actualidad.

RECOMENDACIONES

Los resultados de la presente investigación arrojaron que el costo directo del prefabricado es mayor frente al in situ; no obstante, la duración del proyecto resulta menor usando elementos prefabricados. Dicho lo anterior, se propone para futuras investigaciones, la elaboración de análisis financieros traídos a valor a presente que establezcan si únicamente el factor costo directo es suficiente en la evaluación económica de un proyecto.

La evaluación del programa de obra se estableció únicamente para la duración de la estructura de la edificación y específicamente para el sistema de entepiso; sería importante la evaluación total del impacto del uso de prefabricados en el tiempo, teniendo en cuenta todas las fases del proyecto, desde las actividades preliminares hasta la entrega final de la obra.

El caso de estudio se limitó al análisis de las losas de entepiso, sin embargo, dada la incertidumbre que se maneja y contemplando el uso del prefabricado como una solución constructiva, es importante realizar la misma evaluación y generar mayor investigación para el resto de componentes de la estructura de una edificación.

BIBLIOGRAFIA

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. 2014. CHAPTER 4 — Structural Systems Requirements. Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-S14, and “Commentary”. ACI 318RS-14). Farmington Hills: American Concrete Institute, 2014.

ANDRADE MEJÍA, Álvaro. 1967. Seminario Latinoamericano sobre Prefabricación de Viviendas. Copenhague: Santiago CEPAL, 1967.

ASOCIACIÓN ARGENTINA DEL HORMIGON PREMEZCLADO. 2008. Un poco de historia. s.l.: Revista Construcción y Tecnología, 2008.

ASOCIACIÓN COLOMBIANA DE INGENIERÍA SÍSMICA. 2010. Título A – Requisitos generales de diseño y construcción sismo resistente. Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10. Bogotá: Diario Oficial, 2010.

—. 2010. Título C – Concreto estructural. Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10. Bogotá: Diario Oficial, 2010.

—. 2010. Título H – Estudios Geotécnicos. Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10. Bogotá: Diario Oficial, 2010.

ASOCIACIÓN NACIONAL DE LA INDUSTRIAL DEL PREFABRICADO DE HORMIGÓN ANDECE. 2017. Inicio, Prefabricados de Hormigón. [En línea] 2017. <https://www.andece.org/prefabricados-de-hormigon.html>.

ASOCRETO. 2006. La construcción del concreto en Colombia. Apropiación, Expresión - Proyección. Bogotá: Panamericana formas e impresiones, 2006. 978-958-97371-0.

BABU, J y MAHENDRAN, N. 2013. Design Criteria For Reinforced Concrete Columns Under Seismic Loading. s.l.: International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT), 2013. Vol. 2. 2278-0181.

BUILDING OFFICIALS CODE ADMINISTRATORS INTERNATIONAL. 2000. International Building Code. 2000.

CAMACOL. 2016. EXPOCAMACOL. Medellín: s.n., 2016.

—. 2014. Noticias: Cámara Colombiana de la Construcción CAMACOL. [En línea] 2014. <https://camacol.co/noticias/innovación-clave-para-la-competitividad-del-sector-de-la-construcción>.

CARREÑO BUSTOS, Alejandro David. 2015. Estudio de la prefabricación en concreto reforzado y su influencia en la construcción de estructuras en Colombia. Bogotá D.C.: Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, 2015.

ELLIOT, Kim y JOLLY, Colin. 2013. Multi-storey precast concrete framed structures. Hoboken: Wiley, 2013. 9781405106146.

KOSKELA, Lauri. 2003. Is structural change the primary solution to the problems of construction? Watford: Journal Building Research & Information, 2003.

LÓPEZ BAENA, Alfonso Juan, VALCÁRCE CASES, Miguel y BARBANCHO MEDINA, Manuel. 2005. Indicadores Cuantitativos y Cualitativos para la Evaluación de la Actividad Investigadora: ¿Complementarios? ¿Contradictorios? ¿Excluyentes? 2005.

LÓPEZ FLORES, Jorge Armando. 2016. Fundamentos de Edificación: Notas de Clase. [Presentación] 2016.

LÓPEZ VIDAL, Alejandro y FERNÁNDEZ ORDÓÑEZ, David. 2015. La construcción con prefabricados de concreto: Una historia por escribir. Bogotá: Noticreto, 2015.

MACGREGOR, J. 1992. Reinforced concrete: Mechanics and Design. Englewood Cliffs, Prentice-Hall, 1992. 0-13-770819-X.

MADUEÑO DÍAZ, José Manuel. 2015. Evaluación económica de obras con prefabricados. Bogotá: ASOCRETO, 2015.

MEDINA SÁNCHEZ, Eduardo. 2008. Construcción de estructuras de Hormigón Armado. Madrid: Delta, Publicaciones Universitarias, 2008. 84-96477-96-7.

PARK, Robert y GAMBLE, William. 2000. Reinforced Concrete Slabs. Canada: Wiley, 2000. 0-471-34850-3.

PASQUIRE, Christine, GIBB, Alistair y BLISMAS, Nick. 2005. What Should You Really Measure If You Want to Compare Pre-fabrication with Traditional Construction? Kenley: Rusell, 2005. 1877040347.

PEREA RENTERÍA, Yubely Aleida. 2012. Sistemas constructivos y estructurales aplicados al desarrollo habitacional. Medellín: Universidad de Medellín, 2012.

PHENG, Low Sui y CHUAN, Choong Joo. 2001. Just-In-Time Management of Precast Concrete Components. Singapore: Journal of Construction Engineering and Management, 2001. Vol. 127.

PRECAST/PRESTRESSED CONCRETE INSTITUTE. 2010. About Precast Materials and Methods. 2010.

—. 2010. Beams and Columns. 2010.

—. 2010. Floors and Roofs. 2010.

—. 2010. Transportation Design Resources. 2010.

REGUANT ÁLVAREZ, Mercedes y TORRADO FONSECA, Mercedes. 2016. El método Delphi. Barcelona: REIRE, 2016. 2013-2255.

RODRÍGUEZ CASTILLEJO, Walter. 2013. Gerencia de Construcción y del tiempo-costo. Lima: Macro E.I.R.L., 2013. 978-613304-102-1.

SEGURA FRANCO, Jorge. 2011. Estructuras de Concreto I. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia, 2011. 978-958-99888-0-0.

U.S. GREEN BUILDING COUNCIL (USGBC). 2005. An Introduction to the U.S. Green Building Council and the LEED Green Building Rating System. Washington, DC: s.n., 2005.

UNIVERSIDAD NACIONAL DE LA PLATA. 2014. Catedra de Procesos Constructivos. La Plata: s.n., 2014.

ANEXO A – DISEÑOS CASO A

ANEXO B – CÁLCULOS DE DISEÑO CASO B